

**CAREN MICHELS**

**ANÁLISE DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM COBERTURAS COM  
BARREIRAS RADIANTES**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

Florianópolis – SC

2007

**CAREN MICHELS**

**ANÁLISE DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM COBERTURAS COM  
BARREIRAS RADIANTES**

Dissertação apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil da  
Universidade Federal de Santa Catarina  
como requisito parcial para obtenção  
do Título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Roberto Lamberts  
Co-Orientador: Saulo Güths

Florianópolis

2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**CAREN MICHELS**

Esta dissertação foi julgada e aprovada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

---

Prof. Dr. Glicério Trichês, Dr.  
Coordenador do Programa

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Roberto Lamberts, *PhD.*  
*Universidade Federal de Santa Catarina*  
Orientador

---

Saulo Güths, Dr.  
*Universidade Federal de Santa Catarina*  
Co-Orientador

---

Joaquim C. Pizzutti dos Santos, Dr.  
*Universidade Federal de Santa Maria*  
Membro

---

Enedir Ghisi, PhD.  
*Universidade Federal de Santa Catarina*  
Membro

---

José Antônio Bellini da Cunha Neto, Dr.  
*Universidade Federal de Santa Catarina*  
Membro

Florianópolis, 27 de fevereiro de 2007.

*Dedico este trabalho aos meus pais,  
Ademar e Elga, irmãos, Cristian e Camila  
e ao Mateus, com carinho.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UFSC, que através de seus professores e funcionários, permitiu a realização deste trabalho.

Ao Professor Roberto Lamberts, pelo importante papel de orientador, pelo apoio, pelo exemplo, pela amizade, pelo incentivo e pela paciência.

Ao Professor Saulo Güths, pela colaboração como co-orientador, pelo auxílio, pelo apoio, pelo incentivo, pela amizade e pela paciência.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio através da bolsa de estudos de junho de 2005 a fevereiro de 2007.

Ao LABSOLAR, da UFSC, pelo fornecimento dos dados de radiação solar e velocidade do vento.

Em especial aos meus pais, Ademar e Elga, e aos meus irmãos Cristian e Camila, que mesmo à distância, sempre me deram carinho, apoio, incentivo e compreensão, em todos os momentos da minha vida.

Em especial ao Mateus, pela compreensão, auxílio, apoio e carinho.

A Deus, por ter me permitido a realização deste trabalho e por dar-me forças por superar mais esta etapa.

E a uma série de amigos em geral, que de muitas maneiras colaboraram para o término deste trabalho.

MICHELS, Caren. **Análise da transferência de calor em coberturas com barreiras radiantes.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis.

## **RESUMO**

Nas cidades brasileiras o maior ganho térmico de edificações térreas ocorre pelo telhado. Assim, o emprego de barreiras radiantes tem a função de minimizar o fluxo de calor que atravessa o sistema de cobertura. Apesar da utilização deste tipo de isolante térmico ter crescido nos últimos anos, ainda não existem normas técnicas que tratem do assunto. Conseqüentemente surgiram no mercado muitos produtos que possuem o aspecto de uma barreira radiante, mas não apresentam baixa emissividade. Este trabalho analisa a redução da transferência de calor em uma cobertura provocada pelo uso das barreiras radiantes, através de medições in loco, em laboratório e através de um modelo matemático. Os resultados permitiram comprovar que as barreiras radiantes são eficazes para reduzir a transmissão de calor para o interior da edificação. Enquanto que algumas mantas alcançaram boa eficiência, outras não atingiram a eficiência esperada, evidenciando que muitas barreiras radiantes não apresentam a principal característica de uma barreira radiante: baixa emissividade. Isto pode ocorrer devido à presença de uma camada de polietileno sobre o alumínio. Nesta pesquisa também foi comprovado o efeito do depósito de poeira sobre a superfície aluminizada da barreira radiante, o qual piora o desempenho da manta.

**Palavra-chave:** Barreira radiante, isolante térmico reflexivo, fluxo de calor, emissividade.

MICHELS, Caren. **Evaluation of heat transfer in roofs with radiant barriers**. 2007. Master degree (Civil Engineering) - Graduate Program in Civil Engineering, UFSC, Florianópolis.

### **ABSTRACT**

In Brazilian cities the greatest thermal gain occurs through the roof of single-story buildings. In this regard, the use of thermal radiation barriers has the function of minimizing the heat flux through the roof. Even though the use of this type of thermal insulation has increased in recent years, there are still no technical standards which address the subject. Thus, many products have become available on the market which have the appearance of a radiant barrier, but without low emissivity, and not functioning properly as thermal insulation. The objective of this study was to analyze of heat flux reduction provided by the use of radiant barriers in clay tile roofs, through laboratory and in the field measurements and mathematical model. The results allowed confirm that radiant barriers are efficiency in reduce the heat transfer by the roof to the inside of the building. While some sheets are efficiency in reduce the heat transfer, others didn't present the expected efficiency, showing that many sheets don't have the most important characteristic of this kind of product: low emissivity. This can happen due the presence of a polyethylene layer over the aluminium foil. In this research also was studied the effect of the dust accumulation over the aluminium surface, wich can impoverish the radiant barrier performance.

**Key – words:** Radiant barrier, reflexive thermal insulation, heat flux, emissivity

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....</b>	<b>10</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>12</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>13</b>
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1 OBJETIVOS.....	16
1.1.1 Objetivo Geral.....	16
1.1.2 Objetivos Específicos .....	16
1.2 LIMITAÇÕES DA PESQUISA .....	17
1.3 DELINEAMENTO DA PESQUISA.....	17
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>19</b>
2.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM COBERTURAS .....	19
2.2 CONCEITO DE ISOLAMENTO TÉRMICO .....	21
2.3 ISOLANTES TÉRMICOS POR RADIAÇÃO OU BARREIRAS RADIANTES.....	23
2.4 UTILIZAÇÃO DE EMBALAGENS LONGA VIDA COMO MATERIAL ISOLANTE TÉRMICO .....	41
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>47</b>
3.1 MODELO MATEMÁTICO .....	47
3.1.1 Modelo $\Delta T$ constante (modelo 1) .....	48
3.1.2 Modelo potência dissipada constante (modelo 2) .....	51
3.2 MEDIÇÕES EM LABORATÓRIO .....	54
3.2.1 Avaliação dos modos de medição e comparação teórico/experimental .....	57
3.2.2 Eficiência de algumas barreiras radiantes encontradas no mercado da construção civil de Florianópolis .....	57
3.2.3 Análise do efeito do depósito de poeira sobre a superfície aluminizada da barreira radiante.....	63
3.3 MEDIÇÕES EM CAMPO .....	64
3.3.1 Estimativa do coeficiente de convecção externo .....	70
3.3.2 Comparação teórico/experimental (em campo) .....	70
3.3.3 Comparação experimental (em campo) x experimental (laboratório) .....	71
<b>4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>72</b>
4.1 RESULTADOS DO MODELO MATEMÁTICO .....	72
4.1.1 Avaliação dos modos de medição e comparação teórico/experimental .....	74
4.2 AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE BARREIRAS RADIANTES ENCONTRADAS NO MERCADO DA CONSTRUÇÃO CIVIL .....	77
4.2.1 Análise do efeito da poeira sobre a superfície da barreira radiante.....	81
4.3 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES EM CAMPO .....	86

4.3.1 Fluxo de calor .....	87
4.3.2 Temperatura superficial das faces inferior das telhas e superior do forro .....	91
4.3.3 Cálculo das eficiências ( $\eta$ ).....	97
4.3.4 Análise das eficiências ( $\eta$ ).....	98
4.3.5 Comparação dos resultados teórico-experimentais (em campo).....	105
4.3.6 Comparação das medições em campo x laboratório .....	107
<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>109</b>
<b>SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....</b>	<b>111</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>113</b>
<b>APÊNDICE A – Calibração dos transdutores de fluxo de calor.....</b>	<b>117</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Ilustração 1 - Esquema das trocas de calor em um telhado .....	20
Ilustração 2 - Propriedades radiantes no espectro da radiação solar e do infravermelho longo de materiais de construção.....	21
Ilustração 3 - Estrutura da embalagem. ....	42
Ilustração 4 - Manta refletiva formada pela união das embalagens longa vida .....	43
Ilustração 5 - Modelo térmico 1: A) sem a manta isolante, B) com a manta isolante. ....	48
Ilustração 6 - Modelo térmico: A) sem a manta isolante, B) com a manta isolante. ....	51
Ilustração 7 - Representação do aparato instrumental utilizado .....	55
Ilustração 8 - Representação do aparato instrumental .....	56
Ilustração 9 - Lâmina para a visualização da poeira. ....	64
Ilustração 10 - Lâminas das amostras das mantas 2, 3 e 4 .....	64
Ilustração 11 - Microscópio Olympus PME3 e software Motic Images Advanced 3.1 .....	64
Ilustração 12 - Corte esquemático da residência .....	65
Ilustração 13 - Seções da cobertura.....	66
Ilustração 14 - Corte esquemático do telhado.....	66
Ilustração 15 - Instalação do transdutor de fluxo de calor e do termopar .....	67
Ilustração 16 - Termopar na face inferior da telha .....	67
Ilustração 17 - Vista geral da localização dos transdutores e termopares.....	69
Ilustração 18 - Ilustração das seções .....	69
Ilustração 19 - Vista do telhado .....	69
Ilustração 20 - Dispositivo para estimar o $h_{conv}$ .....	70
Ilustração 21 - Amostra 2a.....	81
Ilustração 22 - Amostra 2b.....	81
Ilustração 23 - Amostra 2c.....	82
Ilustração 24 - Amostra 2d.....	82
Ilustração 25 - Amostra 3a.....	82
Ilustração 26 - Amostra 3b.....	82
Ilustração 27 - Amostra 3c.....	83
Ilustração 28 - Amostra 3d.....	83
Ilustração 29 - Amostra 4a.....	83
Ilustração 30 - Amostra 4b.....	83
Ilustração 31 - Amostra 4c.....	84
Ilustração 32 - Amostra 4d.....	84
Ilustração 33 - Variação do fluxo de calor durante o dia 22/2/06 .....	88
Ilustração 34 - Variação do fluxo de calor durante o dia 21/5/06 .....	89
Ilustração 35 - Variação do fluxo de calor durante o dia 31/7/06 .....	90
Ilustração 36 - Variação das temperaturas superficiais da telha - dia 22/2/2006 .....	91
Ilustração 37 - Variação das temperaturas superficiais do forro - dia 22/2/2006.....	92

Ilustração 38 - Variação das temperaturas superficiais da telha - dia 21/5/2006 .....	93
Ilustração 39 - Variação das temperaturas superficiais do forro - dia 21/5/2006.....	94
Ilustração 40 - Variação das temperaturas superficiais da telha - dia 31/7/2006 .....	95
Ilustração 41 - Variação das temperaturas superficiais do forro para o dia 31/7/2006.....	96
Ilustração 42 - Energia absorvida e perdida pela cobertura para o dia 22/2/2006 .....	98
Ilustração 43 - Eficiência das amostras analisadas para o dia 22/2/2006 .....	99
Ilustração 44 - Eficiência das amostras para o dia 21/5/2006.....	101
Ilustração 45 - Eficiência das amostras para o dia 31/7/2006.....	103
Ilustração 46 - Sistema de calibração com transdutor auxiliar .....	117

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização das amostras analisadas .....	58
Tabela 2 - Amostras analisadas .....	67
Tabela 3 - Resistências térmicas utilizadas para o cálculo do fluxo de calor do modelo 1 .....	72
Tabela 4 - Resistências térmicas utilizadas para o cálculo do fluxo de calor do modelo 2 .....	73
Tabela 5 - Fluxo de calor perante o modelo da diferença de temperatura constante.....	74
Tabela 6 - Eficiência das mantas perante o modelo da diferença de temperatura constante .....	74
Tabela 7 - Passagem do fluxo de calor perante o modelo da potência dissipada constante .....	75
Tabela 8 - Eficiência das mantas perante o modelo da potência dissipada constante .....	75
Tabela 9 - Eficiência experimental e teórica para o modelo 1 .....	76
Tabela 10 - Eficiência experimental e teórica para o modelo 2 (potência dissipada de 275 W/m <sup>2</sup> ) ....	77
Tabela 11 - Eficiência das barreiras radiantes .....	78
Tabela 12 - Estimativa da emissividade das barreiras radiantes .....	80
Tabela 13 - Média das características das amostras 1, 2, 3 e 4.....	84
Tabela 14 - Redução da eficiência das barreiras radiantes .....	85
Tabela 15 - Estimativa da emissividade da superfície da barreira radiante.....	86
Tabela 16 - Variação da temperatura superficial para o horário de pico dos dias analisados .....	97
Tabela 17 - Cálculo da eficiência para as amostras no dia 22/2/2006 .....	104
Tabela 18 - Cálculo da eficiência para as amostras no dia 21/05/2006 .....	106
Tabela 19 - Cálculo da eficiência para as amostras no dia 31/07/2006 .....	108
Tabela 20 - Comparação teórico-experimental (em campo) das eficiências. ....	109
Tabela 21 - Comparação dos resultados das medições em campo e laboratório .....	111
Tabela 22 - Comparação dos resultados das medições em campo e laboratório .....	112
Tabela 25 - Constantes de calibração dos fluxímetros .....	119

## LISTA DE SÍMBOLOS

$h_{\text{conv sem}}$  = Coeficiente de trocas de calor por convecção sem barreira radiante ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ );  
 $h_{\text{conv A,B}}$  = Coeficiente de trocas de calor por convecção ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ );  
 $h_{\text{rad sem}}$  = Coeficiente de trocas de calor por radiação sem barreira radiante ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ );  
 $h_{\text{rad A,B}}$  = Coeficiente de trocas de calor por radiação com barreira radiante ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ );  
 $T_{\text{ext}}$  = Temperatura do ar externo ( $^{\circ}\text{C}$ );  
 $T_{\text{int}}$  = Temperatura do ar interno ( $^{\circ}\text{C}$ );  
 $T_{1,2,3,4,5,6}$  = Temperatura superficial ( $^{\circ}\text{C}$ );  
 $R_{\text{rad sem}}$  = Resistência térmica por radiação sem barreira radiante ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ );  
 $R_{\text{rad A,B}}$  = Resistência térmica por radiação com barreira radiante ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ );  
 $R_{\text{conv A,B}}$  = Resistência térmica do ar no interior do equipamento ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ );  
 $R_{\text{cond telha}}$  = Resistência térmica da telha ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ );  
 $R_{\text{cond forro}}$  = Resistência térmica do forro ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ );  
 $R_{\text{cond manta}}$  = Resistência térmica da manta ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ );  
 $R_{\text{conv ext}}$  = Resistência do ar externo ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ );  
 $R_{\text{conv int}}$  = Resistência térmica do ar interno ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ );  
 $R_{\text{equi sem}}$  = Resistência térmica equivalente sem barreira radiante ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ );  
 $R_{\text{equi A,B}}$  = Resistência térmica equivalente com barreira radiante ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ );  
 $\eta$  = Eficiência da barreira radiante (%);  
 $\eta_{\Delta T}$  = Eficiência da barreira radiante obtida através do modelo 1 (%);  
 $\eta_{\text{Pot}}$  = Eficiência da barreira radiante obtida através do modelo 2 (%);  
 $\varepsilon_{1,2,4,5}$  = Emissividade da superfície;  
 $\varepsilon_{\text{manta sup}}$  = Emissividade da face superior da manta;  
 $\varepsilon_{\text{manta inf}}$  = Emissividade da face inferior da manta;  
 $\alpha$  = Absortividade da superfície;  
 $q_{\text{sem}}$  = Fluxo de calor total sem barreira radiante ( $\text{W}/\text{m}^2$ );  
 $q_{\text{com}}$  = Fluxo de calor total com barreira radiante ( $\text{W}/\text{m}^2$ );  
 $q_{\text{rad}}$  = Radiação solar incidente na superfície do telhado ( $\text{W}/\text{m}^2$ );  
 $\Delta T$  = Diferença de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ );  
 $\text{Pot}$  = Potência dissipada ( $\text{W}/\text{m}^2$ );  
 $A$  = Área ( $\text{m}^2$ );  
 $L$  = Espessura do dispositivo experimental (m);  
 $\lambda_{\text{ar}}$  = Condutividade térmica do ar ( $\text{W}/\text{mK}$ );  
 $\lambda$  = Condutividade térmica de algum material ( $\text{W}/\text{mK}$ );  
 $\sigma$  = Constante de Steffan – Boltzan ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2\text{K}^4$ );  
 $E_{\text{ganho}}$  = Energia absorvida pela cobertura ( $\text{J}/\text{m}^2$ );  
 $E_{\text{perda}}$  = Energia perdida pela cobertura ( $\text{J}/\text{m}^2$ );  
 $E_1$  = Energia absorvida ou perdida pela seção 1 ( $\text{J}/\text{m}^2$ );  
 $E_4$  = Energia absorvida ou perdida pela seção 4 ( $\text{J}/\text{m}^2$ );

## **INTRODUÇÃO**

Nos países tropicais, o maior ganho térmico em edificações térreas ocorre principalmente através da cobertura, por ser a superfície mais exposta à radiação solar. O acréscimo na temperatura interna é percebido principalmente nas residências que possuem telhas aparentes, ou seja, quando a mesma não possui forro (ou laje) para separar o espaço do ático do restante da edificação. Sabe-se que com o uso de telhas de cimento amianto o desconforto térmico é maior do que nas telhas de barro, pois uma parte da energia que incide na superfície das telhas de barro é gasta no processo de evaporação da água, absorvida durante a noite pelas telhas em função da condensação do vapor de água existente no ar, assim, o fluxo de calor que atinge o interior da residência é menor quando comparada com telhas cerâmicas esmaltadas.

Desta maneira, o uso de materiais que minimizem a transferência de calor através da cobertura para o ambiente interno se faz necessário, a fim de reduzir a temperatura interna, proporcionar conforto térmico aos moradores e diminuir o consumo de energia para resfriamento da edificação.

Dentre os produtos utilizados para isolar termicamente, existem os que dificultam a transferência do calor por condução (isolantes resistivos) e os que minimizam a passagem por radiação (isolantes reflexivos) (VITTORINO et al.,2003).

Em relação aos materiais que dificultam a passagem do calor por condução, encontramos a fibra de vidro e lã de rocha, entre outros. O bom desempenho destes materiais está relacionado com o valor da resistência térmica que eles apresentam. Quanto maior o valor da resistência térmica, maior será a resistência à passagem do fluxo de calor para o interior (DOE, 1991).

Os isolantes que reduzem a transferência do calor por radiação, também são chamados de isolantes térmicos reflexivos ou de barreiras radiantes. Este tipo de isolante é formado por um material de baixa emissividade e alta refletividade, o qual reduz a emissão da radiação em onda longa. Assim, os ganhos térmicos no verão e as perdas de calor no inverno são reduzidos. O material comumente utilizado como barreira radiante é o alumínio.

As barreiras radiantes somente entraram efetivamente no mercado nacional por volta de 1995, e desde então, é cada vez mais comum encontrarmos este tipo de material sendo aplicado em coberturas de edificações residenciais, industriais e comerciais (GÜTHS, 2004). A popularização deste material não apresentou reflexo na formulação de normas sobre especificações técnicas dos processos de fabricação e instalação das mantas. Desta forma, surgiram algumas barreiras radiantes ineficientes. A má qualidade de alguns isolantes reflexivos deve-se a alteração do material que constitui a barreira radiante, seja pelo acréscimo de polietileno sobre o alumínio ou pelo material que forma a manta, muitas vezes é utilizado um polímero aluminizado. As mantas formadas desta maneira apresentam o valor da emissividade diferente em relação às barreiras radiantes que apresentam bom desempenho térmico.

Nas edificações de interesse social, geralmente os moradores não utilizam isolantes térmicos devido ao custo que são acrescidos ao valor total da obra. Assim, existe a necessidade de realizar estudos sobre formas alternativas e baratas para viabilizar o seu emprego em habitações de baixo custo. Neste contexto, surge o interesse pelas barreiras radiantes que usam as embalagens longa vida. Estas embalagens são formadas por três materiais, um destes é o alumínio. As camadas que envolvem a embalagem são de difícil separação, e muitas vezes não são recicladas, causando grande impacto ambiental.

O efeito do uso das barreiras radiantes na transferência de calor para o ambiente interno da edificação foi pesquisado nos Estados Unidos, França, Arábia Saudita e Argélia (AL-HOMOUD, 2005. CHEIKH e BOUCHAIR, 2004. FAREY, 1994.

MEDINA 2006. MEDINA 2000. MIRANVILLE, 2003. PARKER et al., 1995. SOUBDHAN et al., 2005. WINIARSKI et al., 1996).

No Brasil, este tema ainda é pouco explorado. Foi pesquisado por Lamberts (1983) e por Vittorino et al. (2003), onde o cálculo da redução no fluxo de calor foi realizado com base nas temperaturas superficiais e nos valores de emissividade dos elementos que formaram a cobertura. Outras pesquisas foram realizadas, porém tratam da análise do desempenho de embalagens longa vida como isolante térmico, pouco analisando o desempenho das barreiras radiantes encontradas no mercado da construção civil.

Esta pesquisa analisou o desempenho térmico das barreiras radiantes encontradas no mercado da construção civil e das mantas formadas pela união das embalagens longa vida. O trabalho apresenta uma bancada experimental para a determinação da redução do ganho de calor proporcionado pela aplicação de barreiras radiantes. Além das medições em laboratório, esta pesquisa realizou medições em campo, onde foi verificada a redução na transferência de calor para o interior em condições reais de radiação solar e velocidade do ar. Por último, realizou-se uma análise teórica do sistema e os resultados foram comparados com os resultados obtidos experimentalmente, tanto em laboratório quanto em campo.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

- Este trabalho tem como objetivo geral avaliar a redução na transferência de calor proporcionada pelo uso de barreiras radiantes em coberturas.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Analisar a eficiência das barreiras radiantes de acordo com dois modelos de medição, um com a potência dissipada constante e o outro com a diferença de temperatura constante. Desta forma, determinar qual destes modelos apresentam valores mais próximos da realidade.

- Avaliar a eficiência de diferentes tipos de barreiras radiantes encontradas no mercado da construção civil, bem como analisar a eficiência das mantas formadas pela união das embalagens de leite longa vida. A eficiência obtida experimentalmente em laboratório será comparada com a obtida através do modelo teórico.
- Verificar a influência da poeira depositada sobre a superfície aluminizada da barreira radiante no desempenho térmico da mesma.
- Determinar a redução da transferência de calor para o interior de uma edificação e a eficiência das barreiras radiantes através de ensaios em campo.
- Avaliar a redução da transferência de calor para o interior com o uso de telhas cerâmicas porosas e brancas através de ensaios em campo.

## **1.2 LIMITAÇÕES DA PESQUISA**

Este trabalho possuiu a limitação de tempo, em relação ao depósito de poeira na face aluminizada das barreiras radiantes. Pois, para que a poeira fosse depositada naturalmente seria necessário um período longo para alcançar três níveis diferentes de empoeiramento.

Em relação à bancada, a limitação refere-se ao coeficiente de troca de calor por convecção na face externa do dispositivo experimental. Esta variável foi considerada igual ao coeficiente de convecção interno, em função da bancada estar instalada no interior de uma sala e não ter sido simuladas as trocas de calor por convecção, na face correspondente as telhas, no aparato experimental.

## **1.3 DELINEAMENTO DA PESQUISA**

A redação desta dissertação está apresentada em cinco capítulos:

O Capítulo 1 apresenta a introdução, a justificativa, os objetivos e as limitações do tema de estudo.

No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica para o desenvolvimento do trabalho, onde são abordados estudos realizados sobre as barreiras radiantes e os conceitos relacionados à proposta de estudo.

O Capítulo 3 descreve a metodologia empregada na pesquisa para atingir os objetivos traçados.

O Capítulo 4 apresenta e discute os resultados obtidos no trabalho. São apresentados os resultados do modelo teórico, das medições em laboratório e das medições em campo.

O último capítulo da dissertação, Capítulo 5, refere-se às conclusões obtidas nesta pesquisa e sugestões para os próximos trabalhos a serem realizados.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### ***2.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM COBERTURAS***

Nas residências horizontais a maior parte exposta à radiação solar é o telhado, o qual absorve grande parte desta energia e a transfere para o interior das edificações, aumentando os ganhos térmicos e conseqüentemente, elevando a temperatura interna.

A radiação solar é composta por radiação infravermelha de onda curta, que ao incidir sobre a superfície das telhas, as aquece. Uma parcela deste calor é perdida por convecção e irradiação ao ambiente externo e a outra parcela, absorvida pelas telhas, é transmitida ao espaço correspondente ao ático. No interior do ático, o calor é transferido das telhas até a superfície do forro por convecção e radiação. O forro absorve parte deste calor e o transmite para o espaço interno da residência, conforme indica a Ilustração 1.

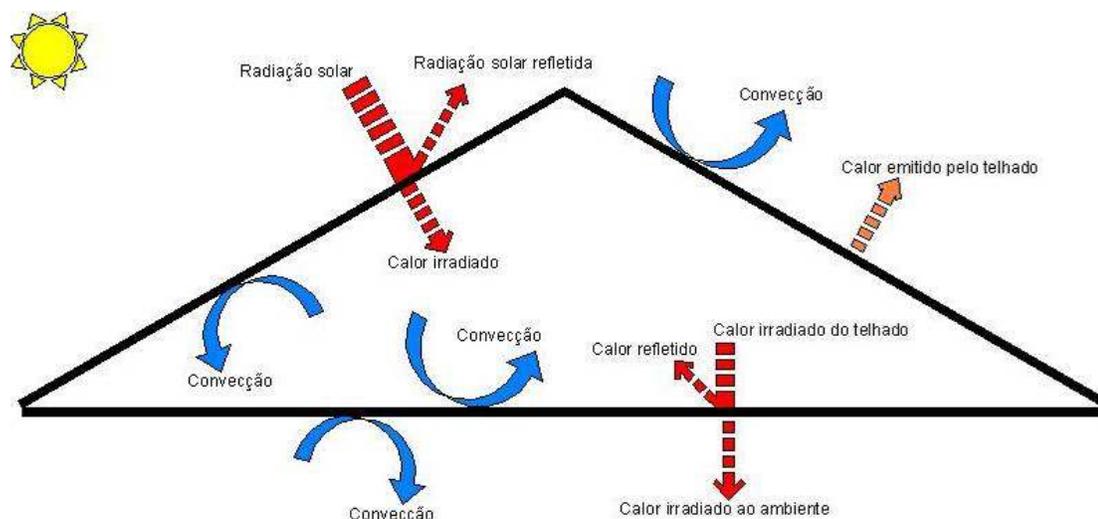


Ilustração 1 - Esquema das trocas de calor em um telhado

O desempenho térmico das coberturas depende das características dos elementos que compõem o telhado, como por exemplo, o material das telhas, a cor da superfície externa, a emissividade, e a ventilação existente na camada de ar correspondente ao ático.

No Brasil, as telhas frequentemente utilizadas na construção são constituídas de dois materiais: cimento amianto e barro. As telhas de fibrocimento geralmente são utilizadas em edificações de baixa renda, por possuir um custo menor em relação às telhas de barro, porém seu desempenho é pior. O que faz com que as telhas cerâmicas tenham melhor desempenho térmico do que as de fibrocimento é a capacidade de absorção de água. Uma vez que, durante a noite, como a temperatura superficial da telha é menor que a do ar, uma quantidade de água pode condensar e ser absorvida pela telha, desta maneira parte da radiação incidente durante o dia é gasta no processo de evaporação da água absorvida. Somente depois de terminado este processo é que as telhas começam a se aquecer. Outra razão para que as telhas cerâmicas apresentem melhor desempenho térmico refere-se à infiltração do ar pelos espaços entre as telhas.

A maior parte dos materiais da construção civil não é de origem metálica (concreto, tijolo, entre outros), assim estes materiais absorvem grande parte da radiação solar, aquecem-se e transferem o calor para o interior da edificação (VITTORINO et al., 2003). A Ilustração 2 mostra as propriedades radiantes de alguns materiais utilizados na construção civil. Observou-se que a folha de alumínio polida, apresenta baixa emissividade (0,05) e alta refletância à radiação de onda

longa (mais de 0,9) ao mesmo tempo em que apresenta baixa absortividade (entre 0,05 e 0,15) e alta refletividade a radiação de onda curta (entre 0,85 e 0,95).

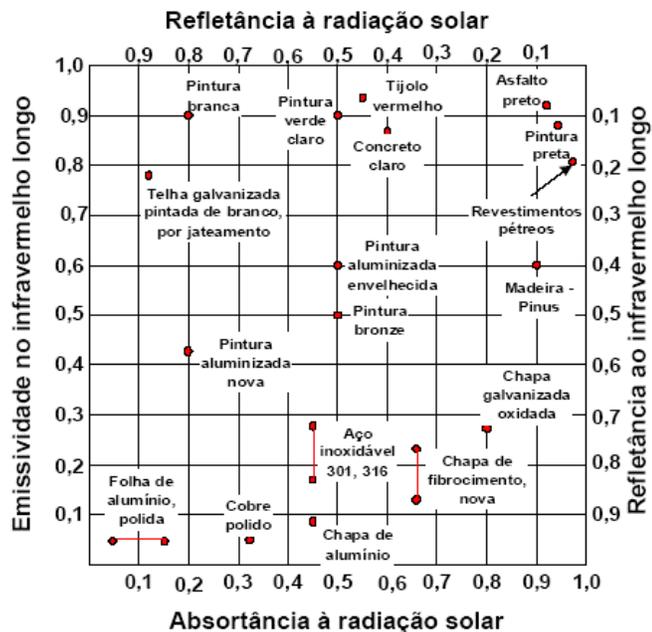


Ilustração 2 - Propriedades radiantes no espectro da radiação solar e do infravermelho longo de materiais de construção (Fonte: VITTORINO *et al.*, 2003)

Os cálculos das trocas de calor por convecção em um telhado não ventilado podem ser realizados através das resistências térmicas de câmaras de ar não ventiladas. A norma brasileira NBR 15220-2, Desempenho térmico de edificações - Parte 2 informa a engenheiros e arquitetos, nos anexos A e B, as resistências térmicas superficiais e das câmaras de ar não ventiladas.

## 2.2 CONCEITO DE ISOLAMENTO TÉRMICO

A finalidade de isolar termicamente é dificultar a transferência de calor entre dois sistemas que se encontram a níveis diferentes de temperatura. O isolamento térmico visa: economia de energia, estabilidade operacional, conforto térmico, evitar a condensação e proteger a estrutura (TORREIRA, 1980). Assim, a razão de isolar termicamente é controlar ao máximo as condições térmicas de um meio habitado diante dos agentes térmicos hostis do meio imediato (RIVERO, 1985).

Para reduzir a transferência de calor de um corpo para o outro, é necessário instalar uma camada entre eles que não seja um bom condutor térmico.

Não existe nenhum material que possa impedir totalmente a passagem de calor. Um bom isolante térmico é um material cuja condutividade térmica é baixa em relação à dos materiais usuais. Normalmente os materiais isolantes térmicos são formados por células de gás ou simplesmente de ar, pois gases estagnados são maus condutores (CUNHA e NEUMANN, 1979).

Conforme Al-Homoud (2005), o isolamento térmico é formado por um material ou combinação de materiais, que, quando aplicados corretamente, retardam a passagem do fluxo de calor que atravessa o envelope da edificação por condução, convecção e/ ou radiação. Esta capacidade de reduzir as trocas de calor é função da resistência térmica que materiais isolantes proporcionam. Segundo o mesmo autor, existem muitos tipos de isolantes térmicos para residências disponíveis no mercado. Os materiais usualmente encontrados são de três tipos: materiais inorgânicos, orgânicos e metálicos ou membranas refletivas. No primeiro grupo existem os materiais fibrosos e celulares, formados pelos materiais: fibra de vidro e lã rocha, silicato de cálcio e vermiculite. O segundo grupo também se divide em dois, materiais fibrosos e celulares, formados por celulose, algodão, madeira, fibras sintéticas e poliestireno, poliuretano e outros polímeros. No último grupo se encontram as mantas formadas por um material de baixa emissividade.

Isolar termicamente uma cobertura sempre esteve relacionado à utilização de materiais conhecidos como resistivos ou isolantes térmicos convencionais (materiais orgânicos e inorgânicos). A resistência térmica destes materiais é devida principalmente à grande quantidade de ar presente entre as fibras ou confinado nas pequenas células formadas no processo de expansão das espumas e dos isolantes granulares. Algumas espumas podem conter ainda nos seus poros outros gases, com condutividade menor que a do ar, dificultando ainda mais a passagem do calor. Outra maneira de reduzir os ganhos térmicos advindos da cobertura pode ser encontrada ao utilizar materiais que tenham baixa emissividade, como os metálicos, emitindo pouco calor para o interior da edificação e refletindo a maior parte da radiação incidente para o ambiente externo. Os materiais que desempenham esta função na construção civil, geralmente são chamados de isolantes térmicos reflexivos ou de barreiras radiantes, pois dificultam a passagem do calor por radiação. O material mais utilizado neste processo é o alumínio. Assim, os isolantes térmicos diferem na maneira de reduzir o fluxo de

calor. As barreiras radiantes reduzem a transferência de calor através da baixa emissão e da alta reflexão da radiação incidente (DOE, 1991).

### **2.3 ISOLANTES TÉRMICOS POR RADIAÇÃO OU BARREIRAS RADIANTES**

O Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE, 1991. DOE, 2002), define barreiras radiantes como materiais que, ao serem instalados em edificações, reduzem os ganhos térmicos no verão e as perdas no inverno, uma vez que estes materiais reduzem a emissão da radiação em onda longa, diminuindo assim o consumo de energia para o aquecimento ou resfriamento da edificação. As barreiras radiantes normalmente são mantas finas e formadas por um material altamente refletivo e de baixa emissividade. O material comumente utilizado é o alumínio aplicado em um ou nos dois lados da manta. Para proporcionar resistência mecânica o alumínio é aplicado em conjunto com outro material, como o papel kraft, filmes plásticos e papelão.

Barreiras radiantes são utilizadas para reduzir a transferência de calor por radiação entre as telhas e o forro (ou laje) da edificação. Todos os corpos emitem ou recebem radiação térmica em função da sua temperatura. A quantidade de energia emitida depende da temperatura e da emissividade de sua superfície. O bom desempenho de uma barreira radiante está associado a algumas propriedades, chamadas de emissividade e refletividade. Quanto maior o poder de reflexão da radiação e menor o poder emissivo de um material, melhor será a barreira radiante. As barreiras radiantes são formadas por materiais que dificultam a transferência de radiação infravermelha de onda longa através de uma camada de ar. Estes materiais realizam isto pela reflexão da radiação incidente e, ao mesmo tempo, pela baixa emissão de energia, ou seja, o material deve possuir baixa emissividade (FAREY, 1994 a).

Medina (2000 a) e Miranville et al. (2003), referiram-se às barreiras radiantes como mantas finas metálicas, normalmente cobertas de alumínio, portanto caracterizadas por possuir ao menos, uma superfície de baixa emissividade (aproximadamente 0,05). Da mesma maneira que as barreiras radiantes reduzem a transferência de calor para o interior da edificação durante o verão, também trazem benefícios para o período do inverno, pois elas diminuem a emissão da radiação em

onda longa. Este tipo de isolante térmico pode ser instalado em qualquer tipo de edificação: residencial, comercial e industrial. Também pode ser instalado em edificações que já possuem algum tipo de isolante térmico, sem a necessidade da retirada deste. Em edificações residenciais, a barreira radiante pode ser instalada de duas maneiras diferentes: pregada nos caibros do telhado, acompanhando a inclinação do mesmo, o qual é chamado de Truss Radiant Barrier – TRB. Também pode ser utilizada horizontalmente sobre o forro ou laje, chamado de Horizontal Radiant Barrier – HRB (FAREY, 1994 b. MEDINA, 2000 a).

Em alguns testes realizados por DOE (1991), foi evidenciado acréscimo na temperatura das telhas com a presença da barreira radiante fixada nos caibros, em média de 1 °C a 5 °C. Ao se utilizar a barreira radiante horizontalmente sobre a laje, a temperatura das telhas foi reduzida em aproximadamente 1 °C.

Foram desenvolvidos alguns experimentos para avaliar o efeito do depósito de poeira sobre a superfície aluminizada da barreira radiante. Estes estudos mostraram que o depósito da poeira aumentou a emissividade e reduziu a refletividade da manta. Isto significa dizer que as partículas de poeira depositadas sobre a barreira radiante reduzem a eficiência da mesma.

Conforme o DOE (1991), não existe ainda um método padrão para avaliar o efeito da barreira radiante na redução do consumo de energia para aquecimento ou resfriamento de uma edificação. Porém, muitos testes foram realizados para mostrar se existe alguma correlação entre a redução das contas de energia e o uso de barreiras radiantes. Estes testes foram realizados em climas quentes onde houve o uso de condicionamento térmico artificial do ar. Os resultados mostraram que nas residências com isolamento térmico R-19 (resistência térmica igual a 3.35 m<sup>2</sup> °C/W), a passagem do fluxo de calor reduziu de 16 a 42% quando comparada com um ático sem o isolamento térmico e sem a barreira radiante. Porém, este resultado não quer dizer que a conta de energia diminuiu na mesma proporção. Ou seja, sabe-se que consumo de energia elétrica para o condicionamento térmico é entre 15 e 25% do consumo total de energia da residência. Multiplicando estes valores, chegou-se a uma redução entre 2 a 10% no gasto com o condicionador de ar.

Conforme Antunes (2005), por evitar a perda de calor e reduzir os ganhos térmicos, as barreiras radiantes ajudam a economizar energia elétrica, principalmente em ambientes climatizados. Numa residência que possui condicionador de ar, em função da redução do fluxo de calor que atinge ao interior

da residência, o aparelho será menos utilizado. O mesmo ocorre para o aquecimento: com a barreira radiante dificultando as perdas, o calor gerado internamente é conservado, reduzindo também a necessidade de utilizar o condicionamento térmico artificial.

O estudo realizado na Colômbia por González et al. (2000) objetivou medir as temperaturas do interior de habitações, utilizando sensores HOBO que permitiram a obtenção de dados para a comparação de três residências iguais, com cobertura de fibrocimento, e com diferentes materiais isolantes. Uma residência recebeu uma pintura seletiva (base de alumínio), outra recebeu uma manta aluminizada e a última recebeu isolamento de fibra de vidro. As comparações foram realizadas com outra residência, igual às outras, porém sem nenhum tipo de isolante térmico. O monitoramento das temperaturas, tanto internas quanto externas, foi realizado por sensores do tipo HOBO, os quais armazenaram os dados a cada 10 minutos, durante o período de quatro dias. A residência que obteve a temperatura interna mais baixa, tanto durante o dia quanto a noite, foi a que recebeu a folha de alumínio, seguida pela que recebeu fibra de vidro. A pintura na telha foi a que menos contribuiu para a redução da temperatura do espaço interno, reduzindo a temperatura interna em torno de 1,5° C. As temperaturas das superfícies internas (paredes) também foram monitoradas e, a residência que recebeu a manta aluminizada foi a que mostrou as menores temperaturas superficiais, seguida pela que recebeu fibra de vidro. A edificação que apresentou menor redução nas temperaturas superficiais foi a que recebeu pintura aluminizada na cobertura.

Medina (2000 a) desenvolveu experimentos e simulações para avaliar o desempenho da barreira radiante através do seu emprego com três níveis diferentes de isolantes térmicos em aplicações residenciais. Os experimentos foram realizados no Texas, USA, comparando os resultados de duas residências iguais. A redução no fluxo de calor transferido para o interior foi calculada conforme ilustra a Equação 1.

$$\eta = \left( 1 - \frac{q_{comBR}}{q_{semBR}} \right) \quad (1)$$

Onde:

$q_{semBR}$  = fluxo de calor sem a barreira radiante

$q_{comBR}$  = fluxo de calor com a barreira radiante

Foi desenvolvido um modelo matemático computacional para calcular o fluxo de calor que atravessa o sistema de cobertura. Para o programa gerar resultados, foi necessário incluir informações, como: dimensões do telhado, constantes de radiação (absortividade e emissividade das superfícies), dados do local, como latitude e longitude, e arquivo climático do local. A verificação do modelo foi realizada com a comparação entre os resultados teóricos e experimentais. As medições foram realizadas no verão e a resistência térmica do isolante existente era de  $3,35 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ . A ventilação no ático foi forçada, para evitar a possibilidade das residências possuírem taxas de ventilação diferenciadas. Os resultados teóricos não diferiram significativamente dos experimentais, a diferença entre os mesmos foi menor que 2%, para os casos com e sem a barreira radiante. A redução no fluxo de calor foi de aproximadamente 34%.

Após terem sido realizados os testes com o modelo matemático e verificado a coerência dos resultados, realizaram-se medições do fluxo de calor em um telhado com a presença de dois isolantes térmicos: a barreira radiante e a fibra de vidro. Os isolantes eram novos no momento da instalação e a resistência térmica da fibra de vidro foi alterada três vezes. Foram realizadas três medições com resistências de 1.94, 3.35 e 5.28  $\text{m}^2 \text{ K/W}$  em combinação com o isolante térmico reflexivo. A barreira radiante em combinação com a resistência térmica de 1.94  $\text{m}^2 \text{ K/W}$  reduziu o fluxo de calor em torno de 42%. Com o uso resistência de 3.35  $\text{m}^2 \text{ K/W}$ , a eficiência da barreira radiante atingiu 28%. Quando se utilizou a barreira radiante em combinação com a fibra de vidro de resistência 5.28  $\text{m}^2 \text{ K/W}$ , a redução no fluxo de calor foi de aproximadamente 25%. Os resultados teóricos diferiram dos experimentais em torno de 2%. De acordo com os resultados, foi verificado que quanto maior a resistência térmica da fibra de vidro, menor é a eficiência da barreira radiante, ou seja, ocorre maior transferência de calor para o interior da residência. A possível causa para isto, segundo o autor, foi que conforme o aumento no nível de isolamento aumentou a temperatura da barreira radiante, assim como outras de partes do ático. Desta maneira, houve maior transferência de calor para o interior e, conseqüentemente a redução da passagem do fluxo de calor proporcionada pela barreira radiante foi menor. Foram ainda realizadas medições conforme o modo de instalação da barreira radiante, utilizada horizontalmente (HRB) sobre a laje ou conforme a inclinação do telhado (TRB). O autor concluiu que a redução do fluxo de calor é pouco dependente da maneira como a barreira radiante foi instalada. Porém,

apesar das barreiras radiantes serem muito utilizadas horizontalmente sobre a laje, este tipo de instalação não é a mais indicada para aplicações residenciais, uma vez que a poeira é facilmente acumulada em sua superfície, podendo aumentar a emissividade da manta.

Soubdhan et al. (2005) analisaram a influência das barreiras radiantes na transferência de calor por condução e radiação quando integradas no envelope da edificação e compararam a eficiência destas mantas com os isolantes térmicos tradicionais (lã mineral, poliuretano). Assim foi possível conhecer qual o isolante térmico que mais reduziu o fluxo de calor através de um telhado residencial, localizado em Guadalupe, na América central (latitude  $16^{\circ}15' N$  e longitude  $60^{\circ}30' O$ ), em uma região tropical.

Para realizar os experimentos foram utilizadas quatro células teste. Cada célula apresentou dimensões de 1,22 m de comprimento por 0,5 m de altura. As paredes e o piso foram isolados termicamente com poliestireno e pintados de branco, a fim de reduzir a transferência de calor através dos mesmos, assim somente foi considerada a transferência de calor pela cobertura. Uma destas células teste foi mantida como padrão, sem nenhum tipo de isolante térmico, e as outras receberam algum tipo de isolante: uma com poliestireno expandido (espessura igual a 4.5 cm), outra com barreira radiante e a última com fibra de vidro (espessura igual a 4.5 cm). Foram realizados ensaios com o telhado das células teste pintado de branco (absortividade = 0.3) e pintado de preto (absortividade = 0.9) e variando a ventilação. As células foram instrumentadas com sensores de temperaturas nas superfícies, com termômetro de globo preto e um outro termômetro localizado no centro das células a fim de medir a temperatura do ar. Os resultados obtidos ao variar a ventilação evidenciaram uma redução de  $10^{\circ} C$  na temperatura superficial da telha, porém não foi indicada a taxa de ventilação utilizada para se atingir esta redução. Segundo o autor, a troca de calor por convecção permitiu a perda de calor da telha para o exterior, reduzindo a temperatura interna. A temperatura interna ficou cerca de  $15^{\circ} C$  menor do que quando não se utilizou ventilação.

Os testes com a telha pintada de branco (com absortividade igual a 0.3) e sem ventilação mostraram que 84% do fluxo de calor que atingiu o interior da célula durante o dia (das 9 horas às 16 horas) foi transferido por radiação e a outra parcela por condução. Com o uso da barreira radiante o fluxo de calor transferido por radiação reduziu em 50% e o fluxo de calor transferido por condução permaneceu

igual ao da célula padrão, evidenciando que as barreiras radiantes são eficazes para diminuir o calor radiante. Já com o uso do poliestireno e da fibra de vidro, a passagem do calor por condução foi 25% maior do que célula padrão. Em relação a redução do fluxo total de calor, foi observado que a barreira radiante proporcionou uma redução de 37%, enquanto o poliestireno e a fibra de vidro reduziram 88% e 84% em telhados não ventilados.

Quando a absorvidade do telhado foi alterada para 0.9 houve maior transferência de calor em todas as células analisadas, e a eficiência das células teste diminuiu, devido ao acréscimo na temperatura da telha e, conseqüentemente a maior transferência de calor para o ambiente interno. A redução no fluxo de calor total foi de 33% com barreira radiante, 73% para a fibra de vidro e 78% para o poliestireno. Assim foi concluído que a transferência de calor por radiação foi predominante nas células analisadas, representando aproximadamente 86% do fluxo de calor total em telhados de telha ondulada metálica. O poliestireno proporcionou melhor resistência à transferência de calor do que a fibra de vidro e a barreira radiante.

O trabalho desenvolvido por Vittorino et al. (2003), no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), analisou a principal propriedade de uma barreira radiante, a baixa emissividade. Para quantificar o efeito das barreiras radiantes no desempenho térmico de coberturas foi utilizado o conceito de blindagem de radiação, que considera a redução nas trocas de calor por radiação que ocorrem entre o telhado e o ambiente com a aplicação deste produto em uma cobertura sem forro. Desta maneira foram adotados os valores para as temperaturas e para as emissividades superficiais do sistema. O fator de forma considerado foi igual a 1, por se tratar de duas superfícies planas e paralelas. Os resultados obtidos mostraram que a inserção de uma manta com emissividade alta reduziu em 50% a passagem de calor para o interior da residência. Com o uso da barreira radiante com uma face aluminizada a redução no fluxo de calor atingiu 85%. O maior desempenho térmico ocorreu ao utilizar a barreira radiante com as duas superfícies aluminizadas, diminuindo em 91%. Ainda nesta pesquisa, os autores salientaram que a instalação inadequada e a composição dos materiais que formam a barreira radiante podem reduzir o desempenho térmico do mesmo, como por exemplo, a presença de uma camada de polietileno sobre a superfície aluminizada. Outros fatores que podem aumentar a emissividade da barreira radiante foram citados nesta pesquisa, e

referiram-se a presença de umidade por períodos longos e ao acúmulo de poeira. Para verificar a influência do depósito de poeira na superfície aluminizada da barreira radiante, realizou-se um experimento, onde se instalou a barreira radiante em uma cobertura e o sistema permaneceu exposto as condições naturais durante um período de sete meses. No término deste período, foram realizadas medições para verificar a emissividade do produto. Foi constatado que a emissividade, no momento da instalação era 0,12 e após os sete meses este valor passou para 0,40, evidenciando acréscimo de 0,28 neste valor. Por esta razão, houve um aumento na transferência de calor do telhado para o ambiente interno da edificação. O autor sugeriu que a barreira radiante deve ser instalada com a face aluminizada voltada para baixo, pois se torna mais difícil ocorrer o depósito de poeira. Neste trabalho, o cálculo do fluxo de calor que atravessa o sistema de uma cobertura não considerou as trocas de calor por convecção existente na camada de ar entre as telhas e a barreira radiante.

Armelin e Cherry (2004) analisaram a redução da transferência de calor para o interior de uma edificação proporcionada pelo uso das barreiras radiantas. Sabe-se que este tipo de material isolante térmico é utilizado principalmente para reduzir o fluxo de calor através da radiação, responsável por mais de 80% do calor entrante em uma residência. Os experimentos foram realizados em Crawley, Inglaterra, no Lafarge Roofing Technical Centre (LRTC). Foram construídos dois aparatos iguais que permitiram a montagem de diferentes configurações de cobertura. A ação do sol foi simulada com a presença de 30 lâmpadas de 500 W cada sobre o aparato. As telhas possuíam coloração vermelho-cerâmica e os testes tiveram a duração de 12 a 24 horas, a fim de atingir regime permanente.

Comparando-se o resultado sem a barreira radiante e sem ventilar a cobertura com o obtido utilizando-se barreira radiante e ventilando o forro, verificou-se que houve uma redução de 80% no fluxo de calor que atravessou o aparato. Um teste foi realizado somente ventilando a cobertura, a qual foi responsável pela redução de 13% no fluxo de calor através do telhado.

A pesquisa desenvolvida por Vecchia (2001), foi realizada experimentalmente, com medições em uma habitação unifamiliar, na cidade de São Carlos, em São Paulo. Foi avaliado o comportamento térmico desta residência sem e com o isolante térmico reflexivo. Os ensaios ocorreram durante cinco dias seguidos para cada caso, no mês de fevereiro. O isolante térmico foi instalado entre

as telhas cerâmicas e o forro de pínus, criando-se duas camadas de ar, uma acima e a outra abaixo da manta isolante. O equipamento utilizado para realizar as medições foi um datalogger CR10X e sistema multiplexador de canais AM 416. No primeiro período, sem isolante térmico, a temperatura interna máxima atingiu 34,6° C. As temperaturas máxima e mínima superficial das paredes cerâmicas da edificação não ultrapassaram a de 31,2° C e 26,4° C, respectivamente. A temperatura superficial do forro atingiu a temperatura máxima em torno de 38° C. Durante o segundo período, os resultados obtidos com camada de isolante térmico reflexivo, de emissividade 0,03 e espessura 0.18 mm, apresentaram redução de aproximadamente 6° C na temperatura média superficial do forro e a temperatura do ar interno não ultrapassou os 30° C. Os valores das temperaturas internas foram reduzidos após a aplicação do isolante térmico. Esta redução foi de 5,1 °C em média.

Para ter confiabilidade nos resultados deste trabalho, as medições com e sem isolante térmico deveriam ter ocorrido simultaneamente, pois as variáveis climáticas, como radiação solar, temperatura externa, velocidade do ar, entre outras, não são iguais para os dois períodos de testes. Apenas foi observado que o uso deste tipo de isolante térmico pode ser eficaz para reduzir os ganhos térmicos através da cobertura, fato verificado pela redução na temperatura superficial do forro.

Cheikh (2003) desenvolveu um estudo na região sul da Argélia. Neste local, a maior causa do desconforto térmico é devido ao calor excessivo, onde um ambiente interno resfriado é o maior desejo dos habitantes. Desta maneira, foi realizado um estudo para reduzir os ganhos térmicos através da cobertura de uma edificação mesclando dois princípios: através do uso de um material de baixa emissividade e do resfriamento evaporativo, além do uso de pedras sobre a laje. O modelo consistiu em um cubo de 3 m x 3 m. A parede sul possuiu uma janela e a parede norte foi provida de porta. Foram construídos dois modelos, o primeiro com uma laje de concreto como cobertura da edificação e o outro com a mesma laje de concreto e sobre ela foi depositada uma camada de pedras imersas em uma camada de água, seguida de câmara de ar e por fim, a manta aluminizada. Este sistema foi cuidadosamente vedado para não ocorrer evaporação da água para o ambiente externo da cobertura. A fim de avaliar se o sistema desenvolvido foi eficaz em reduzir a temperatura interna, o autor desenvolveu um modelo matemático para

determinar a temperatura do ar interno, em função da temperatura do ar externo, radiação solar e convecção do ar. A simulação foi realizada nos dias 26 e 27 de julho. As temperaturas superficiais internas foram calculadas em função das condições externas, através do método das diferenças finitas baseadas no balanço térmico de cada nó utilizado, que permite a determinação da temperatura de qualquer ponto de interesse. Foram desenvolvidas ainda equações para calcular as trocas de calor entre a folha de alumínio e a superfície de cima das pedras, as quais ocorrem por radiação, convecção e evaporação.

Os resultados mostraram que enquanto o modelo 1 atingiu a temperatura de 42,5 °C, o segundo modelo, com as camadas isolantes térmicas, reduziu esta temperatura interna em 8,5° C, chegando em torno dos 34° C, tanto para o período da noite quanto para o período do dia. Ao se inserir a ventilação noturna foi verificado que a temperatura interna da sala diminuiu ainda mais, permanecendo perto dos 30° C para o início da manhã, e próximo dos 32° C para as 20 horas. Através deste experimento foi possível verificar que o telhado evapo-reflexivo reduziu significativamente a temperatura. Com o auxílio do insuflamento de ar noturno no interior da sala, a temperatura interna da mesma apresentou uma redução ainda maior, já que a temperatura externa durante o período da noite foi menor em relação a do período de sol, permanecendo em torno de 24 ° C.

O trabalho desenvolvido por Medina (2000 b), apresentou um estudo sobre o efeito da absorvidade, emissividade, taxa de ventilação no ático e inclinação do telhado no desempenho de barreiras radiantes em áticos de duas edificações residenciais iguais. Foi desenvolvido um modelo matemático para investigar os efeitos, e através deste modelo foram obtidos resultados teóricos, comparados com os resultados experimentais, a fim de validar o modelo matemático. Os experimentos foram realizados no Texas (EUA), onde o clima é subtropical, com verões quentes e invernos amenos. Cada casa teste foi instrumentada com 120 sensores. Foram realizados ensaios sem e com a barreira radiante. A taxa de ventilação foi forçada e foi utilizado isolante térmico de resistência igual a 3,35 m<sup>2</sup>K/W. A temperatura interna das residências foi mantida constante. Para o caso sem barreira radiante a diferença entre os modelos foi menor que 2%. Quando se utilizou a barreira radiante, a diferença entre os modelos teórico e experimental foi menor que 4%. Assim, o modelo teórico apresentou estar de acordo com o experimental. Após esta etapa, foram realizadas as medições

variando a absorvidade do telhado, a emissividade da barreira radiante, a taxa de ventilação e a inclinação do telhado a fim de verificar se estas variáveis influenciam na eficiência da barreira radiante durante os períodos de inverno e verão. Em relação à absorvidade, a pesquisa evidenciou que tanto no verão quanto no inverno a absorvidade da superfície da telha pouco altera a eficiência da barreira radiante, permanecendo em torno de 30% no verão e 5% no inverno.

A emissividade da barreira radiante reduziu a passagem da maior parte da radiação solar incidente na superfície do telhado para o ambiente interno devido a sua baixa emissividade (em torno de 0,05). Segundo o autor, a emissividade pode ser facilmente alterada devido o acúmulo de poeira sobre a superfície aluminizada da barreira radiante. Nesta pesquisa, durante o período de verão, quando o valor da emissividade foi 0,05, a passagem do fluxo de calor foi reduzido em 40% e ao se utilizar uma barreira radiante de emissividade igual a 0,30, a redução no fluxo de calor ficou abaixo de 20%, ou seja, com o acréscimo do valor da emissividade, ocorreu a maior passagem de calor para o ambiente interno da edificação.

A variação na taxa de ventilação tem a função de remover o calor vindo do ático durante o verão e reduzir a condensação do ar durante o inverno. Os resultados dos testes mostraram que a ventilação no ático teve pouco efeito no desempenho das barreiras radiantes. O modelo teórico confirmou estes resultados experimentais. Para o verão, quanto maior a taxa de ventilação, menor foi o desempenho da barreira radiante.

Em relação à variação da inclinação do telhado, foi concluído que durante o inverno, a redução do fluxo de calor pouco dependeu do ângulo da cobertura, cujo desempenho permaneceu em torno de 5%. Já durante o verão, quanto mais inclinado o telhado, menor a redução no fluxo de calor. Desta maneira foi possível dizer que a inclinação do telhado pode ter influência no desempenho da barreira radiante.

A pesquisa desenvolvida por Medina e Young (2006) analisou o desempenho de barreiras radiantes em nove diferentes climas dos EUA através de simulações da transferência de calor e massa em um programa computacional. Foram calculadas trocas de calor sensível e latente para as cargas de aquecimento e resfriamento baseadas no balanço de energia para cada superfície e cada camada de ar. O telhado possuía duas águas e isolamento térmico de resistência  $3,5 \text{ m}^2\text{K/W}$ . Após analisar as características dos climas deste país, o mesmo foi dividido em nove

regiões climáticas, classificadas em savana, úmido subtropical, úmido continental com verão ameno, úmido continental com verão frio, deserto, estepe, marinho, mediterrâneo e áreas altas do oeste. Os resultados deste trabalho ajudaram o autor entender como as barreiras radiantes se comportaram em diferentes climas. As simulações ocorreram durante os meses de verão, de junho a agosto, e o desempenho das barreiras radiantes foi analisado durante os dias 28, 29 e 30 de julho.

Os climas savana, úmido subtropical e deserto apresentaram resultados parecidos, ou seja, o desempenho das barreiras radiantes foi similar, devido a transferência de calor ser geralmente para o interior do espaço condicionado. Isto é, as temperaturas dos áticos são geralmente superiores em relação à do espaço condicionado. Nestes climas, o uso das barreiras radiantes foi eficiente, reduzindo os ganhos térmicos durante o dia e reduzindo as perdas durante o período da noite. A redução no fluxo de calor foi calculada para a hora de pico e para a média do período correspondente ao verão (de junho a agosto). Para o clima savana, a redução para o horário de pico foi de 42% e para a média dos três meses foi de 36,8%. Os climas subtropical úmido e deserto apresentaram reduções no fluxo de calor durante o período de radiação solar, das 10 horas às 18 horas, sendo de 31% e 24% para a hora de pico e 34,3% e 23% para a média dos meses de verão. A razão para o clima de savana ter apresentado melhores resultados foi devido a grande umidade existente neste local. A umidade condensa sobre a superfície e durante o processo de evaporação provoca o efeito de resfriamento na superfície do ático. Segundo o autor, tal processo parece ser maior em presença da barreira radiante, a qual produziu grande diferença na redução do fluxo de calor para o ambiente interno com e sem a barreira radiante, sendo esta a principal causa na diminuição do fluxo de calor.

Nos climas continental úmido (verão frio), continental úmido (verão ameno), áreas altas do oeste e estepe, o fluxo de calor ocorreu em duas direções, ou seja, durante o dia a cobertura absorveu e durante a noite perdeu calor. Nestes climas, as barreiras radiantes foram eficazes em reduzir o fluxo de calor para o ambiente condicionado durante o dia, quando as cargas de radiação foram altas. Já durante a noite, a temperatura externa diminuiu e permaneceu abaixo da temperatura interna da sala, tornando as barreiras radiantes ineficientes. As reduções no fluxo de calor para a hora de pico foram de 54%, 46%, 44% e 36%,

para os climas continental úmido (verão frio), continental úmido (verão ameno), áreas altas do oeste e estepe, respectivamente. Para a média dos meses de verão, a redução no fluxo de calor foi inferior em relação a hora de pico: 25,7%, 30%, 19,7% e 13,7%, respectivamente. Isto ocorreu principalmente para os climas das áreas altas do oeste e estepe, devido às perdas de calor durante a noite e nas primeiras horas da manhã para o ambiente externo.

Nos climas marinho e mediterrâneo houve uma redução de 100% e 97% no fluxo de calor para o horário de pico. Desta maneira a presença da barreira radiante impediu a passagem de quase todo o fluxo de calor para o interior da residência durante o horário de pico. Em oposição ao que ocorreu durante a hora de pico do dia, ao analisar a redução média para os dias analisados, observou-se que a mesma foi pequena, 9,6% para o clima marinho (costa oeste) e 2,3% para o clima mediterrâneo, isto ocorreu em função da necessidade de aquecer o ambiente interno durante o período da noite e nas horas iniciais da manhã.

A eficiência da barreira radiante para o clima marinho (costa oeste) e mediterrâneo chegou a aproximadamente 100%, devido ao pequeno fluxo de calor que chegou à superfície do ático sem a barreira radiante, cerca de  $2,5 \text{ W/m}^2$ . Ao inserir a barreira radiante nesta cobertura, a passagem de calor é quase nula, permanecendo próximo de  $0,5 \text{ W/m}^2$ . Desta maneira o autor pôde dizer que a barreira radiante teve 100% de eficiência para a hora de pico. Ao verificar os três dias, foi observado que o desempenho diminuiu consideravelmente, não chegando a 10%. A média ficou tão baixa em função da barreira radiante não reduzir significativamente as perdas de calor durante a noite.

As medições do trabalho desenvolvido por Dimoudi et al. (2005) foram realizadas em CRES, na Grécia. O desempenho térmico de uma cobertura convencional foi comparado com uma cobertura ventilada através de medições simultâneas em duas células teste. Também foi avaliado o efeito da instalação de barreira radiante no desempenho térmico de uma cobertura. Para executar os ensaios experimentais, a célula teste foi equipada com um sistema de aquecimento e resfriamento. As variáveis climáticas internas e externas também foram monitoradas, como radiação solar (difusa e direta), radiação de onda longa, velocidade e direção do ar, umidade relativa, temperatura superficial e potência de aquecimento e resfriamento. Estes dados foram coletados a cada 1 minuto através de uma central de aquisição de dados. A dimensão do telhado da célula teste era de

2,75 m de largura x 5 m de comprimento, a qual foi dividida em duas partes iguais: uma construída como um telhado padrão e a outra metade construída com um telhado ventilado. As duas metades foram isoladas termicamente uma da outra, para evitar a troca de calor entre elas. O telhado padrão apresentou dimensões de 2,43 m x 2,41 m e espessura total de 19,5 cm, formado por 12 cm de laje de concreto em contato com o interior da sala, 5 cm de poliestireno instalado sobre a laje e 2,5 cm de concreto pré-fabricado, exposto ao ambiente externo. O telhado ventilado apresentou as mesmas dimensões do telhado padrão, porém com espessura total de 25,5 e 27,5 cm, pois além da espessura da laje de concreto, do poliestireno e da cobertura de concreto, havia camadas de ar de diferentes espessuras: 6 cm e 8 cm. Foi instalado na região central deste telhado uma chaminé circular (com 35 cm de altura e 5 cm de diâmetro) para facilitar a saída do ar quente, vindo destas camadas de ar.

O procedimento para o trabalho experimental foi dividido em quatro fases, onde foram analisados diferentes configurações da cobertura ventilada. Inicialmente os ensaios foram realizados com a espessura da camada de ar de 8 cm, sem e com barreira radiante, chamadas de fase 2 e fase 3, respectivamente. Depois, foram realizadas medições com a camada de ar de 6 cm, com e sem barreira radiante, nomeadas de fase 4 e fase 5, respectivamente.

Os resultados mostraram que o melhor desempenho térmico foi alcançado com ventilação da cobertura, quando comparado com a estrutura de cobertura convencional. Uma grande melhora do desempenho térmico foi observada, durante o dia, com a aplicação da barreira radiante, a qual foi instalada em função das altas temperaturas que o telhado atingiu mais de 333 K. Ao ventilar a cobertura, a temperatura da mesma permaneceu 14 K mais fria do que a cobertura padrão. A adição da barreira radiante deixou a temperatura 5 K menor quando comparada com a mesma sem a barreira radiante. Durante a noite, a presença da barreira radiante dificultou a passagem do calor irradiado do ambiente interno para o externo, limitando assim o resfriamento da cobertura. A temperatura do isolamento ficou 1–2 K mais alta do que a cobertura padrão para as duas camadas de ar, ou seja, a barreira radiante ao dificultar a passagem do calor para o interior da edificação durante o dia, melhorou o desempenho térmico. Já durante a noite, dificultou as perdas de calor para o ambiente externo, contribuindo para que a temperatura interna não tenha apresentado uma grande redução.

Os testes de ventilação da cobertura evidenciaram o bom desempenho em termos de demanda de resfriamento e podem contribuir significativamente para a conservação de energia durante o verão em uma edificação. Segundo o autor, a ventilação da cobertura pode ser uma solução para os países do Mediterrâneo, onde a camada de ar intermediária interage ativamente com as condições ambientais. A aplicação de uma barreira radiante foi realizada para melhorar o desempenho da cobertura durante o dia. Durante a noite, o uso de barreira radiante não foi favorável, pois dificulta a saída do calor da cobertura para o ambiente externo.

O trabalho de Winiarski e O'Neal (1996) descreveu o desenvolvimento de um modelo matemático utilizado para calcular a transferência de calor em todas as superfícies do ático. Este modelo considerou duas zonas de ar no espaço do ático, a que fica próxima da laje e a outra, mais próxima das telhas. Foram analisados os resultados com diferentes formas de instalar a barreira radiante em áticos residenciais. Realizaram-se comparações entre os resultados do modelo matemático e dos obtidos experimentalmente. O ático em questão possuiu 5 superfícies, sendo de duas águas, dois oitões e a laje. Cada superfície foi modelada como um plano, o qual apresentou emissividade constante e a respectiva temperatura.

Após descrever como o fluxo de calor foi calculado, o autor detalhou os tipos de barreiras radiantes utilizadas na pesquisa. Foram modeladas três maneiras diferentes de utilizar a barreira radiante: instalando a barreira radiante diretamente sobre a superfície da laje (configuração DRB), instalando a barreira radiante horizontalmente logo acima do isolante térmico presente (HRB) e fixando a barreira radiante ao longo dos caibros (TRB). O último (TRB) foi o caso mais difícil de modelar, pois a instalação da barreira radiante formou uma segunda zona de ar.

O ensaio experimental foi desenvolvido utilizando duas salas testes, de 3,7m x 3,7m x 2,4m, localizado no Texas (EUA). Foram realizados quatro testes, ao quais consistiam em comparações dos casos sem barreira radiante e com a barreira radiante, com três diferentes níveis de isolamento: 1,93, 3,35 e 5,29 m<sup>2</sup> °C/W. A outra comparação foi em relação a localização da barreira radiante no ático, utilizada horizontalmente (HRB) ou inclinada (TRB). A instrumentação das salas teste foi composta por aproximadamente 120 sensores em cada sala. Para medir as temperaturas internas e as superficiais foram utilizados termopares do tipo T. Para medir o fluxo de calor que passou através da cobertura foram instalados 5

fluxímetros de 10 cm x 10 cm. Um piranômetro foi utilizado para medir a radiação solar horizontal.

A comparação entre resultados experimentais e teóricos, em relação à temperatura das telhas, mostrou boa acuracidade entre os mesmos. Este resultado mostrou que a presença da barreira radiante aumentou a temperatura das telhas para o horário de pico em torno de 1 a 2 ° C. Em relação ao fluxo de calor, os resultados dos modelos experimental e teórico apresentaram valores que parecidos. No caso sem barreira radiante, o modelo teórico apresentou um maior fluxo de calor (em torno de 6% a mais) em relação ao experimental para o horário de pico. Já para a média diária, esta diferença chegou a 14%, pois segundo o autor, o modelo não está bem ajustado para as perdas de calor durante a noite. A comparação entre os casos HRB e TRB mostrou que, durante todo o período de teste, o fluxo de calor total da configuração HRB foi 5,8% menor do que a TRB.

A pesquisa realizada por Lamberts (1983) na cidade de Porto Alegre (RS), analisou o desempenho térmico de coberturas leves com ático. Para a montagem dos telhados, foi construída uma sala (3,5m x 2,1m), a qual foi coberta por duas coberturas de telhas cerâmicas, de dimensões de 1,13m, x 2,64m cada uma. Uma foi mantida como padrão para a realização de comparações. As paredes receberam a aplicação uma camada de terra de 1,3 m de altura, exceto na parede norte, devido à presença de uma porta, a fim de reduzir as trocas de calor nestas superfícies. Foram realizados quatro testes na bancada: o primeiro com ambos os telhados iguais, para averiguar a igualdade das duas coberturas. O segundo teste foi realizado com a telha cerâmica e uma folha de alumínio sob as mesmas. No terceiro teste, a lâmina de alumínio permaneceu na cobertura e as telhas foram pintadas de branco. Para a execução do quarto teste, a folha de alumínio foi retirada e as telhas brancas foram mantidas. Os testes foram comparados com o telhado considerado padrão. Em todas estas etapas, foram medidas a temperatura, a velocidade e direção do ar, a radiação solar e peso úmido da telha.

Os resultados mostraram que o melhor desempenho térmico ocorreu com o teste 3 (folha de alumínio + pintura branca nas telhas), seguido do teste 2 (somente folha de alumínio) e em último lugar ficou o teste 4 (somente pintura branca nas telhas). O teste 3 foi o que apresentou melhor desempenho em função da baixa emissividade da telha e devido a baixa absorvidade das telhas pintadas de branco.

Experimentos realizados na Flórida por Parker et al. (1995), examinaram o efeito de barreiras radiantes no consumo de energia pelo uso ar condicionado em edificações. Os ensaios ocorreram em nove residências, de 1991 a 1994, todas diferentes umas das outras, desde a área interna das mesmas até os materiais e cor das telhas. Em cima do forro das edificações foi adicionada uma camada de fibra de vidro, a qual reduziu a infiltração de ar do ambiente para o ático. O termostato foi mantido a 26° C e a leitura do consumo de energia foi realizado a cada 30 minutos. Após algum tempo de medição, foi instalado um telhado refletivo em cada uma das residências.

A residência 1, obteve uma redução no consumo de energia de 661 W, que correspondeu a uma economia de 28% no horário de pico. A residência 2 representou a aplicação ideal do revestimento refletivo, ou seja, a edificação possuiu um telhado plano sem espaço disponível para aplicar algum isolante térmico na cobertura. O termostato ligava o condicionador de ar ao meio dia e só desligava às 19 horas. O condicionador funcionou na carga máxima com uma demanda de aproximadamente 2243 W. Após a instalação da cobertura refletiva, esta demanda foi reduzida para 1385 W, a qual conferiu uma redução de 38% no consumo de energia durante o horário de pico. A residência 3 foi a menor analisada, a única que apresentou um aparelho condicionador de ar de parede, sendo assim, não havia os conjuntos de dutos que o condicionador de ar central possui. Nesta edificação, a temperatura interna é muito alta e o termostato dificilmente desligava. Para este caso, a redução no consumo de energia para a hora de pico foi de 30% e de 25% para todo o período do verão. A residência 4 foi escolhida por ter reclamado à concessionária de energia que suas contas estavam elevadas, pois a edificação possuía um bom isolamento térmico e o sistema de ar condicionado era eficiente. Tal fato deveu-se a um vazamento encontrado nos dutos do aparelho, o qual não foi consertado. A redução no consumo de energia foi de 15%. A residência 5 foi escolhida devido às telhas, que eram de cimento, antigas e cinzas. Esta residência também apresentou pouco isolamento térmico e um sistema de ar condicionado ineficiente. Para este caso, a redução foi de 988 W para o horário de pico da demanda para resfriamento, ou seja, uma redução de 20%. A residência 6 apresentou uma redução no consumo de energia para a hora de máxima demanda de 10%. A residência 7 obteve uma redução de 12% no consumo de energia para a hora de pico. A residência 8 era utilizada como escritório no Florida Solar Energy

Centre (FSEC). As telhas eram metálicas e onduladas e o isolamento térmico do telhado foi feito fibra de vidro. Ao instalar a barreira radiante, a economia encontrada foi de 22% para a hora de maior demanda de energia.

O consumo médio da eletricidade para o condicionamento de ar em edificações residenciais na Florida (EUA) foi de aproximadamente 4400 kWh/ano. Baseado nas economias entre 10-40%, os telhados reflexivos reduziram o uso da eletricidade da casa por economias anuais de 440 a 1760 kWh/ano, correspondendo a economias de \$35 a \$140 em taxas de eletricidade. Os pesquisadores concluíram que o uso de barreiras radiantes representou uma opção atrativa para reduzir a carga anual de resfriamento, chegando a uma redução de até 40%.

Güths (2004) em seu estudo desenvolveu uma bancada para determinar a eficiência das barreiras radiantes baseado no uso de transdutores de fluxo de calor. Para tanto, desenvolveu dois modelos teóricos, os quais consideram as trocas de calor que ocorrem em uma cobertura: o primeiro modelo foi calculado através da diferença de temperatura constante e o segundo modelo através da potência dissipada constante. O primeiro modelo considerou que a telha e a laje encontravam-se a temperatura constante e uniforme. Neste modelo, o calor foi transferido por convecção e radiação, as quais estão incorporadas nas resistências térmicas das camadas de ar.

O segundo modelo considerou que uma potência constante era dissipada, simulando a ação do sol. Parte deste calor é absorvida pelas telhas e transmitida ao interior da edificação e outra parte é perdida por convecção ao ambiente externo. A parcela transmitida é conduzida por radiação e convecção em direção ao forro ou laje da edificação. O calor absorvido pelo forro é transmitido para o interior da edificação por convecção e radiação. Segundo o autor, este modelo se aproximou mais da realidade por considerar o aquecimento na superfície das telhas ocasionado pela presença das mantas isolantes.

O aparato experimental construído para analisar a eficiência das barreiras radiantes é fundamentado no fluxo de calor que atravessa o sistema. Sendo assim, o dispositivo procurou reproduzir as características de uma cobertura real, em relação às resistências térmicas dos elementos construtivos e das camadas de ar.

Os ensaios foram realizados com a finalidade de reproduzir os modelos teóricos. A eficiência das barreiras radiantes foi calculada através da equação 2.

$$\eta = \left(1 - \frac{V_{com}}{V_{sem}}\right) \times 100 \quad (2)$$

Onde  $V_{sem}$  é a tensão gerada no transdutor sem a barreira radiante e  $V_{com}$  é a tensão gerada com a presença da manta isolante.

Os ensaios foram realizados para quatro diferentes configurações: a primeira foi a mantida como padrão (sem manta), e segunda apresentou um filme de alumínio pintado com tinta preta, a terceira conteve uma folha de alumínio de cozinha e a última configuração analisada foi uma manta de polietileno de espessura igual a 4 mm (não aluminizada). Foi verificado que para o modelo 1, os resultados teóricos e experimentais não diferiram significativamente para as configurações analisadas, mostrando o bom desempenho do dispositivo.

Os resultados para o segundo modelo, da potência dissipada constante, mostraram uma ligeira diferença entre os resultados, porém os resultados mantiveram a mesma seqüência. Foi observado que para este modelo, os valores de eficiência foram menores dos obtidos com o modelo 1, da diferença de temperatura constante. Segundo o autor, este fato deve-se ao aumento da temperatura das telhas devido a presença do isolante térmico. Após este fato o autor analisou a eficiência de algumas mantas perante os dois modos de medição. Para o modelo 1, foram analisados uma manta de polietileno expandido aluminizada em uma face, e as mantas formadas pela união das embalagens longa vida, com e sem a camada de polietileno sobre a face aluminizada. A manta que apresentou a maior redução no fluxo de calor foi a formada pelas embalagens longa vida sem a camada de polietileno, atingindo a eficiência de 82%. As outras duas mantas obtiveram o desempenho semelhante, mostrando uma eficiência de aproximadamente 70%.

Para o modelo da potência dissipada constante, foi analisada somente a eficiência da manta de polietileno aluminizada em uma face. A eficiência desta atingiu 42%. Segundo o autor, esta redução na eficiência quando comparada com o modelo 1 deve-se ao aquecimento das telhas e conseqüentemente, da maior transferência de calor para o interior.

Foi analisada a influência da variação do coeficiente de convecção externo e interno da edificação e foi observado que a eficiência apresentou uma melhora até  $h_{int}$  e  $h_{ext} = 20$  (W/m<sup>2</sup>K). m relação ao aumento da espessura da telha e da laje, a eficiência mostrou-se ser pouco dependente destas variáveis. O autor

verificou ainda a influência da inclinação do telhado, passando de 0° para 20° e a eficiência da manta apresentou uma melhora de 4%.

Através destas pesquisas pôde-se perceber que as barreiras radiantes foram eficazes em reduzir a transferência de calor para o interior da edificação. O desempenho das mesmas está associado à principal propriedade que uma barreira radiante pode apresentar, baixa emissividade. A maior parte das pesquisas que analisou a eficiência das barreiras radiantes foi realizada internacionalmente, e nacionalmente, existe um pequeno número de pesquisas realizadas nesta área. No Brasil, a pesquisa relacionada ao desempenho das barreiras radiantes é necessária não somente para avaliar o seu comportamento na redução do fluxo de calor advindo da cobertura, mas também porque existem muitos produtos sendo comercializados sem ter a principal característica dos isolantes térmicos reflexivos, ou seja, sem apresentar a emissividade entre 0,05 e 0,1. Estas pesquisas normalmente levam em consideração a diferença de temperatura do ar com e sem a barreira radiante para avaliar o desempenho deste tipo de isolante térmico.

Desta maneira, esta pesquisa analisou a eficiência de quinze isolantes térmicos reflexivos de diferentes fabricantes, através de medições em laboratório com o uso de transdutores de fluxo de calor. Através dos resultados foi realizada uma comparação entre as eficiências das diversas barreiras radiantes. Também foi realizado um experimento em campo para analisar o real desempenho térmico das barreiras radiantes.

## **2.4 UTILIZAÇÃO DE EMBALAGENS LONGA VIDA COMO MATERIAL ISOLANTE TÉRMICO**

As embalagens Longa Vida foram inventadas por Ruben Rausing e a comercialização iniciou-se em 1952 na Suécia. Desde então o seu uso tem aumentado por todo o mundo. No Brasil, o uso de embalagens cartonadas iniciou-se em 1957, a primeira fábrica foi inaugurada em 1978 em Monte Mor (SP) e a segunda em 1999 em Ponta Grossa (PR).

A embalagem é formada por três diferentes materiais (papel, alumínio e polietileno). Os alimentos, antes de serem embalados, passam pelo processo de ultrapasteurização, que consiste na elevação da temperatura até 145 °C, durante 3 a

5 segundos, sendo posteriormente resfriados e embalados de forma asséptica. Desta forma, é uma embalagem que protege bem o produto e evita o desperdício de alimentos, sem necessidade de refrigeração, chegando intactos e perfeitos para o consumo (CEMPRE, 2005).

A principal matéria-prima utilizada na fabricação das embalagens cartonadas é o papel, produzido a partir de fibras de celulose obtidas de florestas plantadas (pínus), manejadas e certificadas pelo FSC (Forest Stewardship Council). O papel utilizado para a fabricação da embalagem é o duplex, formado por uma camada de celulose marrom e uma camada de celulose branqueada que recebe a impressão. A Ilustração 3 mostra as diferentes camadas que compõe a embalagem cartonada longa vida.

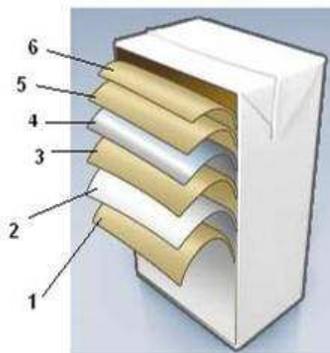


Ilustração 3 - Estrutura da embalagem (Fonte: Tetra Pak<sup>®</sup>, 2005).

Onde:

1. Polietileno: Protege contra a umidade exterior;
2. Papel: Para estabilidade e resistência;
3. Polietileno: Camada de aderência;
4. Folha de alumínio: Barreira contra oxigênio e luz (proteção ao aroma);
5. Polietileno: Camada de aderência.
6. Polietileno: Protege o líquido.

A embalagem longa vida é utilizada para garantir a durabilidade e a qualidade dos alimentos nela acondicionados. Após o consumo, estas embalagens tornam-se lixo de difícil decomposição. A maior parte deste lixo destina-se para aterros sanitários, contribuindo para a ocupação de áreas e o aumento do volume de lixo a ser depositado.

Conforme o CEMPRE (compromisso empresarial de reciclagem), em 2004 foram recicladas cerca de 22% das embalagens longa vida, totalizando cerca de 35.000 toneladas. O processo de reciclagem das fibras de papel consiste na desagregação do papel através de agitação mecânica em equipamento chamado hidrapulper. O papel obtido é utilizado na fabricação de caixas de papelão, embalagens para ovos, palmilhas para sapatos ou papel para impressão e escrita.

Porém, o processo de reciclagem da embalagem não depende somente de novas tecnologias, depende principalmente da consciência de cada cidadão em separar o lixo e também da estrutura do município para a coleta seletiva do lixo. A reciclagem do lixo, além de gerar trabalho e renda para muitas pessoas, traz benefícios ao meio ambiente, deixando-o mais limpo, evitando o desperdício e a extração de materiais.

Segundo o economista Rizzo (2002), um exemplo interessante a ser dado é o caso do alumínio. A cada tonelada de alumínio reciclada, é evitada a retirada de 5 toneladas de minério de bauxita, sem dizer que o processo de transformação do minério em alumínio consome muita energia. Para se ter uma idéia do que isso significa para a natureza, cada tonelada de embalagem longa vida reciclada gera cerca de 650 quilos de papel Kraft, o que evitará o corte de 20 árvores cultivadas em reflorestamento comercial.

A união das embalagens cartonadas longa vida transforma-se em barreira radiante. Assim o material que poderia se tornar lixo, transforma-se em material isolante térmico para edificações de todos os tipos. A Ilustração 4 mostra a manta formada pelas embalagens longa vida.



Ilustração 4 - Manta refletiva formada pela união das embalagens longa vida

A pesquisa desenvolvida por Labaki et al. (2003) na Unicamp, comparou o desempenho de uma cobertura de fibrocimento sem forro com as mantas formadas através das embalagens cartonadas longa vida, abertas, voltadas para cima e para baixo, e com as embalagens unidas e embalagens fechadas (com uma camada de ar no interior da embalagem).

O desenvolvimento do trabalho foi realizado no laboratório de conforto ambiental da faculdade de Engenharia Civil da Unicamp, através da elaboração de duas câmaras de madeira iguais, sendo a fonte de aquecimento cinco lâmpadas incandescentes de 100 W cada. Uma destas caixas foi mantida padrão, com cobertura de fibrocimento. A outra câmara foi utilizada com a mesma telha de fibrocimento, porém com a presença da manta com a camada aluminizada voltada para cima, voltada para baixo e com as caixas fechadas. Esta última, formando uma camada de ar de 6,2 cm de espessura. As temperaturas foram medidas com medidores digitais de temperatura. Estas câmaras foram construídas com a intenção de simular a situação real de uma edificação exposta à radiação solar. O aquecimento se prolongou por um período não inferior a 120 minutos e foram feitos sete testes para cada tipo de manta. Os resultados mostraram a embalagem armada, com as caixas de leite fechadas, foi a que obteve maior eficiência, pois a diferença média de temperatura entre as embalagens foi de  $3,24^{\circ}\text{C}$ , seguida pela manta simples face, com a face aluminizada voltada para o interior da câmara, apresentando diferença de temperatura de  $2,30^{\circ}\text{C}$ . O caso que mostrou pior eficiência foi a manta com alumínio em uma face voltada para cima, a diferença de temperatura entre as duas câmaras foi de  $1,89^{\circ}\text{C}$ . A autora descreveu que o melhor desempenho térmico, em relação as embalagens armadas, foi alcançado devido a presença de ar dentro das embalagens, a qual proporcionou maior resistência térmica à passagem do calor.

A eficiência obtida pelo segundo caso, conforme a pesquisadora deveu-se a redução no fluxo de calor provocada pela superfície de baixa emissividade estar voltada para baixo. O pior desempenho foi atingido em função da face de baixa emissividade estar voltada para cima, segundo a autora.

O cálculo do fluxo de calor que atravessou o sistema não considerou as trocas de calor por convecção no interior das câmaras. A barreira radiante deveria apresentar bom desempenho térmico até mesmo quando a face aluminizada foi utilizada para cima, em função da emissividade ser a mesma para os dois casos.

O Projeto Forro Vida Longa, conduzido por Schmutzler (2001) foi um dos pioneiros, no Brasil, em incentivar o reaproveitamento das embalagens longa vida após o consumo. Além de proporcionar conforto térmico aos moradores de edificações, este projeto também tinha os objetivos de promover benefício ecológico, economia de energia e benefício social, uma vez que criaria uma atividade para as pessoas. A pesquisa descreveu os procedimentos básicos para a utilização das embalagens, os quais são: coleta, abertura, limpeza e desinfecção, e por fim, a união das embalagens através da colagem (com cola de sapateiro ou cola quente). Após a formação das mantas, as mesmas foram instaladas no telhado, deixando uma camada mínima 2 cm de ar entre a barreira radiante e as telhas.

As mantas formadas pelas embalagens também foram utilizadas como persianas em janelas. Foram realizados alguns testes para comprovar a eficácia deste material como isolante térmico. Durante 9 meses, as mantas foram deixadas expostas à intempéries de duas maneiras: com a face aluminizada voltada para cima e para baixo. Após este tempo, a primeira perdeu a camada de polietileno e a camada de alumínio continuou com muito brilho. Já a segunda, com a deterioração do polietileno sobre o papelão, o mesmo apresentou estragos provocados pelas chuvas (pois o papelão começou a absorver água).

A fim de verificar o desempenho térmico deste material foram realizadas algumas simulações em laboratório, onde se comparou o desempenho destas mantas com duas mantas encontradas comercialmente. Para tanto, foi construída uma bancada de testes, que apresentou dois compartimentos cobertos com telhas de cimento amianto. Estes compartimentos foram aquecidos por lâmpadas, simulando a ação do sol. Um dos compartimentos permaneceu apenas com a cobertura de cimento amianto e o outro recebeu a manta abaixo desta cobertura. A temperatura foi medida com termômetros digitais. Os resultados mostraram que a manta formada pelas embalagens de leite e utilizada com a face aluminizada voltada para baixo foi ligeiramente melhor do que algumas mantas encontradas no mercado. A manta de embalagens cartonadas com a face aluminizada voltada para cima possuiu praticamente o mesmo desempenho em relação a mesma manta utilizada com a face de baixa emissividade voltada para baixo.

Foram realizados outros experimentos modificando-se a cor e o material da telha sem utilizar a barreira radiante. As telhas de cimento amianto foram classificadas em nova, cinza e preta, todas expostas ao sol direto. O resultado

evidenciou que a diferença de temperatura superficial da telha de cimento amianto variou muito com a absorvidade do telhado. Com a telha nova a temperatura máxima atingida por ela foi de 40,8° C. Com a telha cinza, esta temperatura atingiu 51,4° C e com a telha preta a temperatura máxima alcançou 56,7° C. A telha de barro, sob as mesmas condições atingiu 40,3° C. Segundo o autor, o problema das telhas de cimento amianto foi relacionado à pequena espessura das mesmas.

Percebeu-se que no território nacional existem estudos que analisam o desempenho térmico das barreiras radiantes formadas pelas embalagens longa vida. O desempenho térmico deste material normalmente foi calculado com base na diferença de temperatura do ar entre o espaço interno do protótipo e a temperatura externa. Também ainda não existe um estudo que comprove a durabilidade deste material quando aplicado como subcobertura, recebendo uma grande quantidade de calor e muitas vezes água, devido a infiltrações que possam ocorrer nos telhados. Porém, o seu emprego deve ser incentivado por se tratar de um material de fácil acesso e que pode reduzir a temperatura interna das residências de interesse social.

## **METODOLOGIA**

### **3.1 MODELO MATEMÁTICO**

Os modelos matemáticos utilizados nesta pesquisa foram desenvolvidos por Güths (2004), os quais representam as trocas de calor em uma cobertura, em relação às resistências térmicas formadas pelos elementos construtivos e pelas trocas de calor por convecção e radiação. Estes modelos foram chamados de modelo 1 (da diferença de temperatura constante) e de modelo 2 (da potência dissipada constante), descritos nos itens 3.1.1 e 3.1.2.

As equações da transferência de calor para os dois modelos, as mesmas foram inseridas no software EES, a fim de resolver o sistema de equações e, conseqüentemente, calcular o fluxo de calor total sem ( $q_{sem}$ ) e com a barreira radiante ( $q_{com}$ ), bem como a eficiência ( $\eta$ ) da mesma. Desta forma, calculou-se a redução teórica no fluxo de calor que atingiu o interior da edificação proporcionada pelo uso das barreiras radiantes. O número de *Nusselt* foi considerado igual a um (1) nos dois modelos, por se tratar de placas planas paralelas, vedadas lateralmente.

Os resultados obtidos com a resolução dos modelos matemáticos foram comparados com os resultados encontrados nos ensaios em laboratório e em campo. Assim, foi possível verificar se a bancada mostrou resultados condizentes

com a realidade e definir o modo de medição em laboratório que forneceu os resultados mais próximos da situação real em uma cobertura.

### 3.1.1 Modelo $\Delta T$ constante (modelo 1)

Este modelo considera que a telha e a laje (ou forro) da edificação encontram-se a temperatura constante e uniforme, sendo o calor transmitido por radiação e convecção. As trocas radiantes estão incorporadas nas resistências térmicas das camadas de ar existentes no interior do equipamento. A Ilustração 5 mostra esquematicamente o modelo da diferença de temperatura constante com as resistências térmicas consideradas para o cálculo do fluxo de calor com e sem a barreira radiante.

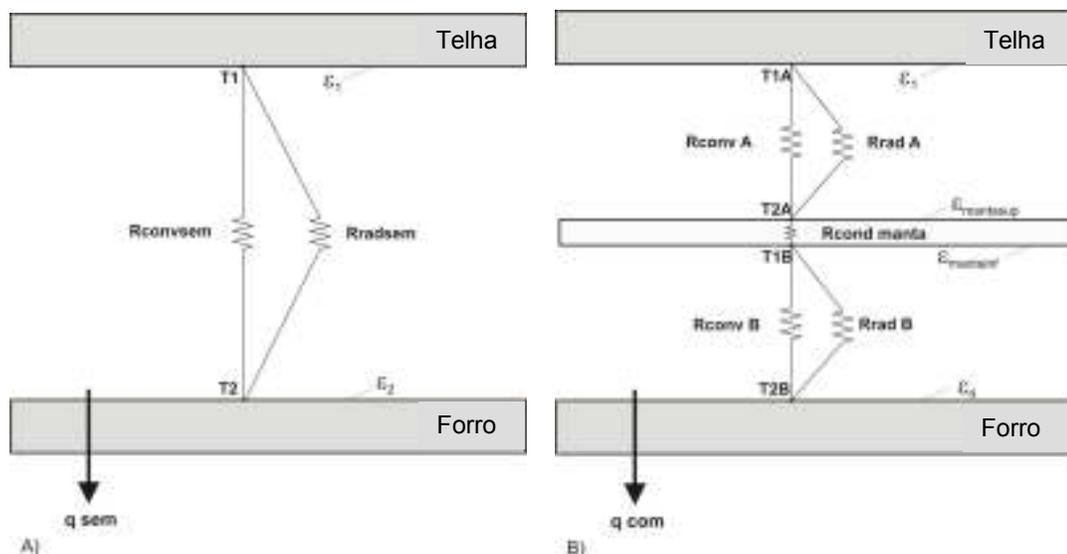


Ilustração 5 - Modelo térmico 1: A) sem a manta isolante, B) com a manta isolante  
(Fonte: GÜTHS, 2004).

A resistência térmica da troca de calor por convecção, formada na camada de ar presente no interior do dispositivo experimental, pode ser calculada como o inverso do coeficiente de convecção, conforme mostra a Equação 3.

$$R_{conv} = \frac{1}{h_{conv}} \quad (3)$$

Onde:

$R_{conv}$  = Resistência térmica por convecção ( $m^2K/W$ );

$h_{conv}$  = Coeficiente de troca de calor por convecção ( $W/m^2K$ ).

Através da equação 4 calculou-se o coeficiente de trocas por convecção ( $h_{conv}$ ). Como o dispositivo experimental é plano ( $i=0^\circ$ ), o número de *Nusselt* é igual a 1 (condução pura) (BEJAN, 1990) por se tratar de duas placas paralelas infinitas, fechadas lateralmente. O coeficiente de trocas de calor foi calculado pela equação 5.

$$Nu = \frac{h_{conv} \times L}{\lambda_{ar}} \quad (4)$$

$$h_{conv} = \frac{\lambda_{ar}}{L} \quad (5)$$

Logo:

$$R_{conv} = \frac{L}{\lambda_{ar}} \quad (6)$$

Onde:

$L = 0.04$  m sem barreira radiante, e  $0.02$  m com barreira radiante;

$\lambda_{ar}$  = condutividade térmica do ar.

O procedimento para o cálculo da resistência térmica que representa as trocas de calor por radiação está ilustrado na Equação 7. A resistência foi calculada como o inverso do coeficiente de trocas por radiação ( $h_{rad}$ ). O cálculo do coeficiente de trocas de calor está demonstrado na equação 8.

$$R_{rad} = \frac{1}{h_{rad}} \quad (7)$$

Onde:

$$h_{rad} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \times \sigma \times (T_1^2 + T_2^2) \times (T_1 + T_2) \quad (8)$$

Onde:

$h_{rad}$  = Coeficiente de troca de calor por radiação (W/m<sup>2</sup>K);

$\varepsilon_1$  = Emissividade da superfície 1;

$\varepsilon_2$  = Emissividade da superfície 2;

$\sigma$  = Constante de Stefan Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>k<sup>4</sup>);

$T_1$  = Temperatura da superfície 1 (°C);

$T_2$  = Temperatura da superfície 2 (°C).

A resistência térmica por condução na barreira radiante, pode ser calculada através da equação 9. Porém, este valor é muito próximo de 0, em função da espessura da manta ser muito pequena.

$$R_{cond} = \frac{e}{\lambda} \quad (9)$$

Onde:

$e$  = espessura do material (m);

$\lambda$  = condutividade térmica do material (W/mK).

Com base na equação 1 a eficiência de uma barreira radiante com o modelo da diferença de temperatura constante, pôde ser calculada de acordo com a equação 10.

$$\eta_{\Delta T} = 1 - \left( \frac{R_{equisem}}{R_{equiA} + R_{manta} + R_{equiB}} \right) \quad (10)$$

Onde,

$$\frac{1}{R_{equi}} = \frac{1}{R_{conv}} + \frac{1}{R_{rad}} \quad (11)$$

Onde:

$R_{equi}$  = Resistência equivalente das trocas de calor por radiação e convecção (m<sup>2</sup>K/W);

$R_{conv}$  = Resistência térmica da troca de calor por convecção (m<sup>2</sup>K/W);

$R_{rad}$  = Resistência térmica da troca de calor por radiação (m<sup>2</sup>K/W).

### 3.1.2 Modelo potência dissipada constante (modelo 2)

Este modelo considera que uma potência constante é conduzida pelo telhado, simulando a radiação solar. Parte é absorvida para o interior da edificação e outra parte é perdida por convecção para o ambiente externo. A parcela transmitida é conduzida por radiação e convecção em direção à laje ou forro, sendo então dissipada por convecção para o interior da edificação.

As resistências térmicas formadas por este modelo estão representadas na Ilustração 6. Este modelo considera as trocas de calor externas a superfície das telhas, como a trocas de calor por convecção e radiação, bem como a transferência de calor por condução no interior das telhas e do forro.

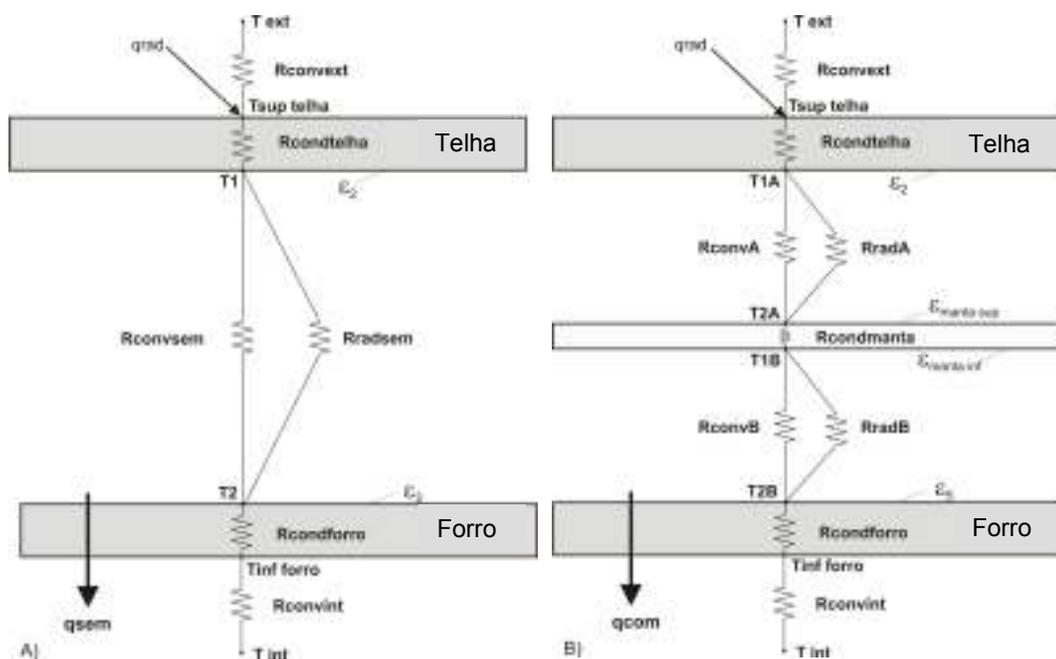


Ilustração 6 - Modelo térmico: A) sem a manta isolante, B) com a manta isolante  
(Fonte: GÜTHS, 2004).

As resistências térmicas formadas pelas trocas de calor por condução nas telhas, no forro e na manta foram calculadas pela Equação 12, a qual foi obtida através da razão da espessura do material pela sua condutividade térmica. O valor da condutividade térmica dos materiais foi encontrado na NBR 15220-2.

$$R_{cond} = \frac{e}{\lambda} \quad (12)$$

Onde:

$e$  = espessura do material (m);

$\lambda$  = condutividade térmica do material (W/mK).

A resistência às trocas de calor por convecção no interior do dispositivo foi calculada através da Equação 13. Os valores de resistência térmica na superfície externa e interna da edificação foram adquiridos na norma brasileira NBR 15220-2. Assim, a resistência térmica da superfície externa ( $R_{se}$ ) das telhas foi considerado igual a 0,04 m<sup>2</sup>K/W e a resistência térmica da superfície do forro ( $R_{si}$ ) foi considerado igual a 0,17 m<sup>2</sup>K/W.

$$R_{conv} = \frac{1}{h_{conv}} \quad (13)$$

Onde:

$R_{conv}$  = Resistência térmica por convecção (m<sup>2</sup>K/W);

$h_{conv}$  = Coeficiente de troca de calor por convecção (W/m<sup>2</sup>K).

O coeficiente de convecção interno ( $h_{conv}$ ) do dispositivo experimental foi calculados com base na Equação 14. O número de *Nusselt* foi considerado igual a 1, devido a inclinação do telhado ser igual a 0°.

$$Nu = \frac{h_{conv} \times L}{\lambda_{ar}} \quad (14)$$

$Nu$  = Número de *Nusselt*;

$h_{conv}$  = Coeficiente de troca de calor por convecção (W/m<sup>2</sup>K);

$L$  = Espessura da camada de ar (m);

$\lambda_{ar}$  = condutividade térmica do ar (W/mK).

A resistência térmica da troca de calor por radiação, sem e com isolante térmico reflexivo, é o inverso do coeficiente de trocas por radiação ( $h_{rad}$ ), conforme mostram as Equações 15 e 16.

$$R_{rad} = \frac{1}{h_{rad}} \quad (15)$$

$$h_{rad} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \times \sigma \times (T_1^2 + T_2^2) \times (T_1 + T_2) \quad (16)$$

Onde:

$R_{rad}$  = Resistência térmica por radiação ( $m^2K/W$ );

$h_{rad}$  = Coeficiente de troca de calor por radiação ( $W/m^2K$ );

$\varepsilon_1$  = Emissividade da superfície 1;

$\varepsilon_2$  = Emissividade da superfície 2;

$\sigma$  = Constante de Stefan Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} W/m^2k^4$ );

$T_1$  = Temperatura da superfície 1 ( $^{\circ}C$ );

$T_2$  = Temperatura da superfície 2 ( $^{\circ}C$ ).

Solucionando o sistema de equações em função  $T_1$ , no programa Maple, chegou-se ao fluxo de calor que atingiu o interior da edificação através da cobertura antes da instalação da manta ( $q_{sem}$ ):

$$q_{sem} = \frac{R_{convext} \times q_{rad} + T_{ext} - T_{int}}{R_{convext} + R_{telha} + R_{equisem} + R_{forro} + R_{convint}} \quad (17)$$

Onde:

$q_{sem}$  = Fluxo de calor total sem a barreira radiante ( $W/m^2$ );

$R_{convext}$  = Resistência térmica na superfície externa das telhas ( $m^2K/W$ );

$R_{convint}$  = Resistência térmica do ar no ambiente interno na edificação ( $m^2K/W$ );

$R_{telha}$  = Resistência térmica da telha ( $m^2K/W$ );

$R_{forro}$  = Resistência térmica do forro ( $m^2K/W$ );

$R_{equisem}$  = Resistência térmica equivalente da câmara de ar sem a barreira radiante ( $m^2K/W$ );

$T_{ext}$  = Temperatura externa do ar ( $^{\circ}C$ );

$T_{int}$  = Temperatura interna do ar ( $^{\circ}C$ ).

Através da mesma metodologia chegou-se ao fluxo de calor que foi transferido ao ambiente interno da edificação após a instalação da manta ( $q_{com}$ ):

$$q_{com} = \frac{R_{convext} \times q_{rad} + T_{ext} - T_{int}}{R_{convext} + R_{telha} + R_{equiA} + R_{manta} + R_{equiB} + R_{forro} + R_{convint}} \quad (18)$$

Onde:

$q_{com}$  = Fluxo de calor total com a barreira radiante (W/m<sup>2</sup>);

$R_{equiA}$  = Resistência térmica equivalente da câmara de ar A (m<sup>2</sup>K/W);

$R_{equiB}$  = Resistência térmica equivalente da câmara de ar B (m<sup>2</sup>K/W);

$R_{manta}$  = Resistência térmica da barreira radiante (m<sup>2</sup>K/W).

Aplicando a Equação 1, chegou-se ao cálculo da eficiência teórica para o modelo 2 ( $\eta_{Pot}$ ) e pode ser calculada de acordo com a Equação 19.

$$\eta_{Pot} = 1 - \left( \frac{R_{convext} + R_{telha} + R_{equisem} + R_{forro} + R_{convint}}{R_{convext} + R_{telha} + R_{equiA} + R_{manta} + R_{equiB} + R_{forro} + R_{convint}} \right) \quad (19)$$

Onde:

$\eta_{Pot}$  = Eficiência teórica da barreira radiante com o modelo da potência dissipada constante (%).

Através da equação 19, foi observado que a eficiência das mantas aluminizadas depende das resistências térmicas formadas pelos elementos construtivos e das camadas de ar que formam o sistema de uma cobertura.

Para este modelo foram avaliados alguns parâmetros que possam influenciar a eficiência da barreira radiante. Foram avaliados os seguintes parâmetros:

### **3.2 MEDIÇÕES EM LABORATÓRIO**

Os ensaios laboratoriais foram conduzidos no Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas (LMPT), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). O equipamento utilizado nas medições procurou reproduzir as características de um telhado convencional, em relação às resistências térmicas formadas pelas trocas de calor que ocorrem em uma cobertura. Este equipamento mede o fluxo de calor para os dois modelos teóricos desenvolvidos por GÜTHS (2004). Desta forma, as medições em laboratório objetivaram avaliar qual destes dois modelos aproximou-se mais da situação real em uma cobertura e verificar a redução no ganho de calor proporcionado pela aplicação de diversas barreiras

radiantes. Ainda foi analisada a influência do depósito de poeira sobre a face aluminizada da barreira radiante no desempenho térmico da mesma.

Os ensaios em laboratório foram separados em três etapas, sendo a primeira referente à comparação teórico experimental, a segunda está relacionada ao cálculo da eficiência de diversas mantas isolantes e na última etapa, encontra-se a metodologia utilizada para a análise do efeito da poeira na eficiência da barreira radiante.

O dispositivo experimental utilizado para as medições laboratoriais é fundamentado na informação do fluxo de calor que atravessa o sistema. O fluxo é medido por um transdutor de calor (GÜTHS et al., 1995), com dimensões de 100 mm x 100 mm.

O aparato está representado na Ilustração 7. O dispositivo reproduz as características de um telhado em função das resistências térmicas. A resistência aquecedora simula o aquecimento por radiação solar e a camada isolante 1 a resistência térmica da telha. Já a camada isolante 2 reproduz a resistência térmica de uma laje convencional somada à resistência térmica do ar no interior da edificação. O dispositivo apresenta uma área útil de 0,6 m x 0,6 m e espessura variável, dependendo do isolamento lateral. Como padrão utilizou-se 40 mm ou 20mm + 20mm quando a manta é instalada. O transdutor de fluxo de calor foi colado na região central da chapa metálica. Um termopar tipo T, em modo diferencial, monitora a diferença de temperatura entre as faces.

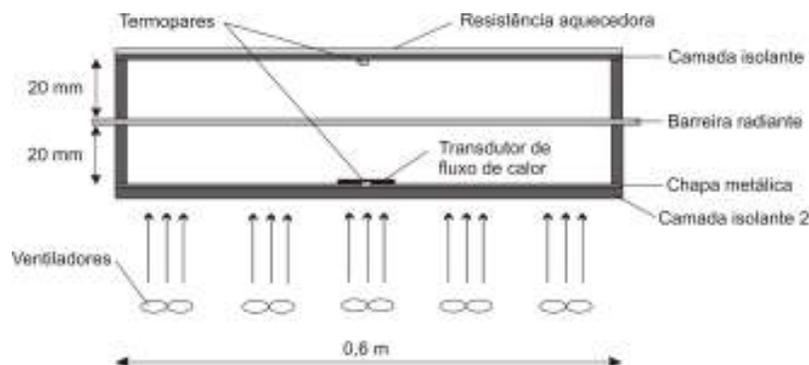


Ilustração 7 – Representação do aparato instrumental utilizado

Fonte: Güths (2004)

A resistência aquecedora apresenta uma potência máxima de 2500 W ( $6944 \text{ W/m}^2$ ) a 220 V, a qual pode ser controlada por um variador de tensão, varivolt

ou por um sistema PID. A temperatura inferior foi mantida igual a temperatura do ambiente através da utilização de convecção forçada, induzida por 6 ventiladores axiais (diâmetro = 120 mm). As trocas térmicas na face superior da resistência aquecedora (simulando o ar externo), ocorreram por convecção natural, em ambiente com temperatura controlada (aproximadamente 22 °C). Todas as superfícies, incluindo o transdutor, são pintadas com tinta preta fosca ( $\epsilon \approx 0,9$ ). A tensão gerada pelo transdutor de fluxo de calor e pelo termopar é medida por um microvoltímetro marca AGILENT, modelo 34401A, com resolução de 0,1 $\mu$ V.

Este equipamento experimental pode medir o fluxo de calor para os dois modelos analíticos, descritos nos itens 3.1.1 e 3.1.2, ou seja, para a diferença de temperatura constante e o para a potência dissipada constante. Após a obtenção do regime permanente registra-se o fluxo de calor indicado pelo transdutor ( $q_{sem}$ ). A manta é inserida e, sob mesma diferença de temperatura ou potência dissipada, é registrado o novo valor do fluxo de calor ( $q_{com}$ ). A eficiência ( $\eta$ ) de uma barreira radiante pode ser considerada como a razão da energia bloqueada com a aplicação da mesma para os dois modelos analíticos, conforme mostra a Equação 1.

A Ilustração 8 mostra uma fotografia do dispositivo experimental, evidenciando a inserção de uma manta aluminizada de polietileno.

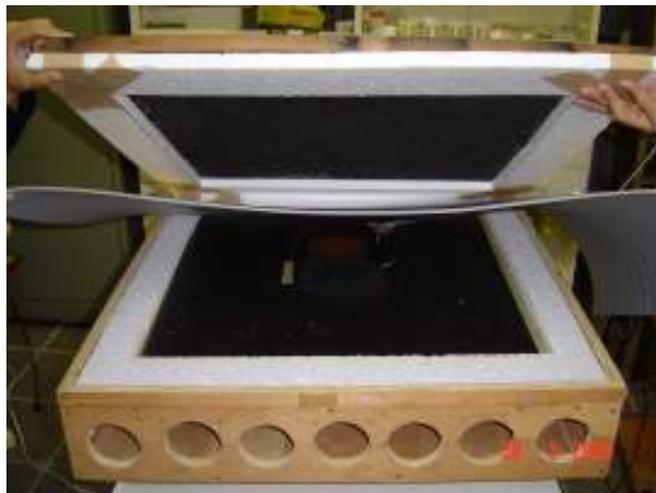


Ilustração 8 – Representação do aparato instrumental  
Fonte: GÜTHS (2004).

### **3.2.1 Avaliação dos modos de medição e comparação teórico/experimental**

Realizaram-se ensaios com os dois modos de medição do fluxo de calor, a fim de calibrar o dispositivo experimental. Para tanto, foram realizadas três medições para cada modelo, alterando-se a diferença de temperatura e a potência dissipada. As medições com o modelo da diferença de temperatura constante foram realizadas para o  $\Delta T$  de 10 °C, 20 °C e 40°C. As potências dissipadas para as medições no segundo modelo foram de 120W/m<sup>2</sup>, 275 W/m<sup>2</sup> e 590 W/m<sup>2</sup>. As mantas utilizadas nesta parte da pesquisa foram: uma folha de alumínio de cozinha e a uma lona plástica preta.

Após esta análise, os resultados experimentais das medições em laboratório obtidos através dos modelos 1 e 2, foram comparados com os resultados teóricos para estes modelos, respectivamente. A medição laboratorial para o modelo 1 foi realizada para o  $\Delta T$  de 25° C. Para o modelo 2 a potência dissipada foi de 275 W/m<sup>2</sup>.

### **3.2.2 Eficiência de algumas barreiras radiantes encontradas no mercado da construção civil de Florianópolis**

Este ensaio referiu-se à medição da redução no fluxo de calor proporcionado pelo uso de diversas barreiras radiantes. Dentre estas mantas, dezoito (18) foram encontradas no mercado da construção civil de Florianópolis e duas (2) foram confeccionadas através da união das embalagens de leite longa vida, as quais foram costuradas umas as outras até formarem mantas de 1m<sup>2</sup>. Uma destas mantas foi mantida com a camada de polietileno sobre a face aluminizada da manta. Na outra, esta camada foi retirada manualmente, uma vez que todas as tentativas de retirar este material de forma rápida e eficaz não foram bem sucedidas. As mantas utilizadas para os ensaios estão ilustradas e descritas na Tabela 1.

Em função da ausência de um equipamento que medisse a emissividade das barreiras radiantes utilizadas nos ensaios, este valor foi estimado por meio do modelo matemático e do dispositivo experimental. Para tanto, reproduziu-se a eficiência obtida experimentalmente no modelo teórico através de modificações no valor da emissividade da manta até que a eficiência teórica fosse igual à

experimental. Este procedimento foi realizado para todas as barreiras radiantes, inclusive quando existiam mais de uma manta do mesmo fabricante. No caso das barreiras radiantes de um mesmo fabricante apresentar diferentes valores de emissividade, foi calculado um valor médio de emissividade.

O fluxo de calor para as barreiras radiantes com uma face aluminizada foi medido com esta face voltada para baixo.

Tabela 1  
Caracterização das amostras analisadas

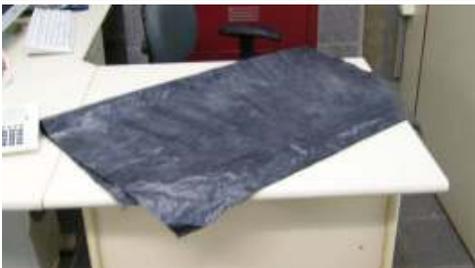
Fabricante	Amostra	Imagem	Características
-	A		Alumínio de cozinha e = 0,1 mm
-	B		Lona plástica preta e = 0,2 mm
1	C		Polímero aluminizado + camada de polietileno e = 1,2 mm
	D		Polímero aluminizado + camada de polietileno e = 2 mm

Tabela 1  
Caracterização das amostras analisadas (continuação)

Fabricante	Amostra	Imagem	Características
1	E		<p>Polímero aluminizado + camada de polietileno + Polímero aluminizado e = 2,2 mm</p>
	F		<p>Polímero aluminizado + camada de polietileno e = 5,5 mm</p>
	G		<p>Polímero aluminizado + camada de polietileno + Polímero aluminizado e = 5,1 mm</p>
2	H		<p>Polímero aluminizado + camada de plástico bolha e = 3 mm</p>

Tabela 1  
Caracterização das amostras analisadas (continuação)

Fabricante	Amostra	Imagem	Características
3	I		<p>Folha de alumínio+ papel kraft+adesivo e = 0,4 mm</p>
	J		<p>Folha de alumínio+ papel kraft+ folha de alumínio e = 0,1 mm</p>
	K		<p>Alumínio + malha de reforço de poliuretano e = 0,1 mm</p>
4	L		<p>Polímero de alumínio + polietileno 2 mm e = 2,1 mm</p>

Tabela 1  
Caracterização das amostras analisadas (continuação)

Fabricante	Amostra	Imagem	Características
4	M		<p>Polímero de alumínio + polietileno e = 4,1 mm</p>
5	N		<p>Folha de alumínio+ tela plástica (base de poliuretano) + folha de alumínio e = 0,2 mm</p>
6	O		<p>Folha de alumínio + papel kraft e = 0,1 mm</p>
7	P		<p>Alumínio + reforço e = 0,1 mm</p>

Tabela 1  
Caracterização das amostras analisadas (continuação)

Fabricante	Amostra	Imagem	Características
7	Q		Alumínio + reforço + alumínio e = 0,1 mm
Embalagens Longa Vida	R		Camada de polietileno + alumínio + papel kraft + polietileno e = 0,9 mm
	S		Alumínio + papel kraft + polietileno e = 0,6 mm
-	T		Folha de EPS e=10 mm

### **3.2.3 Análise do efeito do depósito de poeira sobre a superfície aluminizada da barreira radiante**

A barreira radiante utilizada neste processo foi a manta P (fabricante 7), aluminizada em uma face. Esta manta foi escolhida em razão de ter apresentado bom desempenho térmico em relação às demais mantas. Estes ensaios foram realizados em laboratório com o modo de medição 1, com a diferença de temperatura constante ( $\Delta T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ). A barreira radiante foi dividida em quatro partes iguais, cada uma medindo 1m x 1m. Uma destas amostras foi mantida como padrão (sem poeira) e as demais receberam quantidades diferentes de poeira, chamadas de amostras 2, 3 e 4.

A poeira foi aplicada na superfície da barreira radiante artificialmente. Ou seja, as amostras não foram instaladas numa cobertura e deixadas por um período até que a poeira fosse depositada naturalmente, em função de não se ter disponibilizado um período extenso para adquirir os níveis de empoeiramento desejados para a realização deste experimento. Assim, a poeira utilizada neste ensaio foi obtida no interior de um aspirador de pó.

Para a adesão das partículas de poeira, primeiramente foi borrifada água sobre a manta e logo após foi depositada a poeira com o auxílio de uma peneira, a fim de evitar que partículas muito grandes fossem depositadas e também para homogeneizar a distribuição da poeira sobre a superfície. O acréscimo da quantidade de poeira foi proporcionado através da repetição deste processo até que se atingisse o nível de empoeiramento desejado.

No centro de cada uma destas mantas, foram inseridas lâminas a fim de coletar amostras das mesmas e visualizá-las em um microscópio. A Ilustração 9 mostra a lâmina na região central da manta e a Ilustração 10 mostra as lâminas das três barreiras radiantes empoeiradas, cada uma com um nível de poeira. A presença destas lâminas proporcionou um retângulo (1 cm x 3 cm) sem poeira na região central da amostra. Assim, para solucionar este problema, foi depositada poeira nesta região sem o auxílio da peneira e, ao invés de se utilizar um borrifador de água, utilizou-se um conta-gotas.

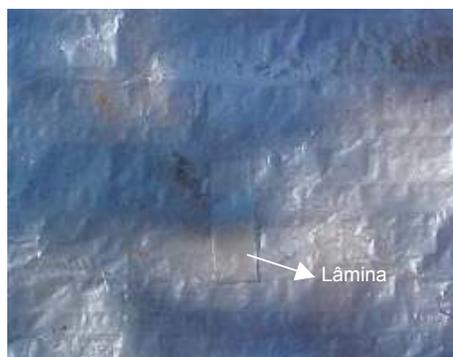


Ilustração 9 – Lâmina para a visualização da poeira no Microscópio *Olympus PME3*.

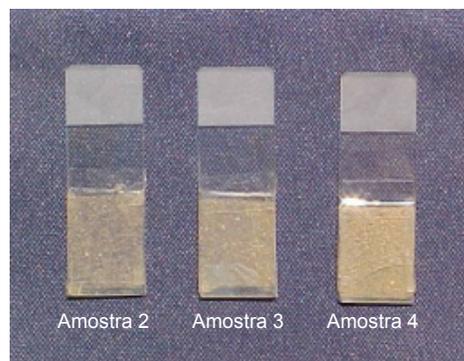


Ilustração 10 – Lâminas das amostras das mantas 2, 3 e 4.

A quantificação da poeira existente sobre a superfície de cada amostra foi realizada através da visualização das amostras no microscópio *Olympus PME3*. Através do software *Motic Images Advanced 3.1*, foram capturadas quatro imagens de cada amostra. Este programa segmenta a imagem e realiza alguns cálculos, como por exemplo, a dimensão total da imagem, a quantidade, em porcentagem, de partículas que estão cobrindo a imagem, a área e perímetro das partículas. A Ilustração 11 mostra o microscópio utilizado para a captura das imagens das amostras e a visualização de uma destas imagens no monitor.



Ilustração 11 – Microscópio *Olympus PME3* e software *Motic Images Advanced 3.1*

### **3.3 MEDIÇÕES EM CAMPO**

Este ensaio foi realizado no município de Florianópolis, localizado no estado de Santa Catarina (SC), 27° S de latitude e 48° O de longitude, na região Sul do Brasil. A edificação localiza-se no bairro Cacupé e possui dois pavimentos.

A cobertura da residência é composta por telhas cerâmicas esmaltadas na coloração avermelhada e o forro existente na edificação é de madeira, não havendo o espaço referente ao ático. A água da cobertura em que foram construídas as seções possui orientação nordeste ( $20^\circ$  NE), recebendo radiação solar das 8:00 até aproximadamente às 18:00 horas, e está localizada acima de um dormitório, conforme indica a Ilustração 12. Nesta água, foram construídas oito seções, com dimensões de 0,6 x 0,4 m cada uma.

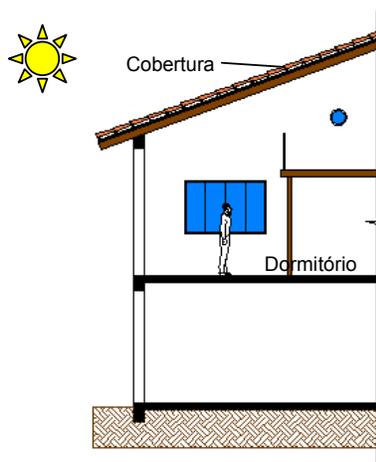


Ilustração 12 - Corte esquemático da residência

A montagem das seções foi realizada durante os dias 9 e 13 de fevereiro de 2006. As medições iniciaram-se durante o dia 14/2/2006 e terminaram no dia 15/8/2006. A Ilustração 13 mostra esquematicamente a distribuição das seções na cobertura, chamadas de seções 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8.

Em cada seção houve a presença de um transdutor de fluxo de calor (fluxímetro), o qual foi calibrado pela autora do trabalho. A metodologia empregada e as constantes de calibração estão apresentadas no apêndice A.

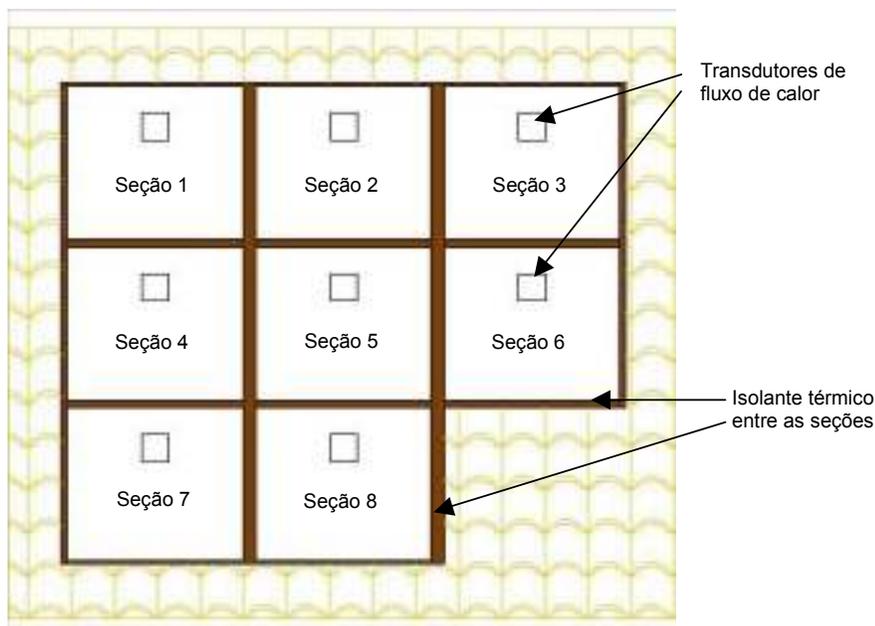


Ilustração 13 - Seções da cobertura

A Ilustração 14 apresenta um corte esquemático da localização das mantas, dos transdutores e dos termopares. Com a inserção das mantas, formaram-se duas camadas de ar (acima e abaixo da manta), com aproximadamente 2 cm de espessura. O isolamento térmico entre as seções foi realizado com “espuma de colchão”, o qual possuiu espessura irregular em função de preencher o espaço entre as telhas e o forro.

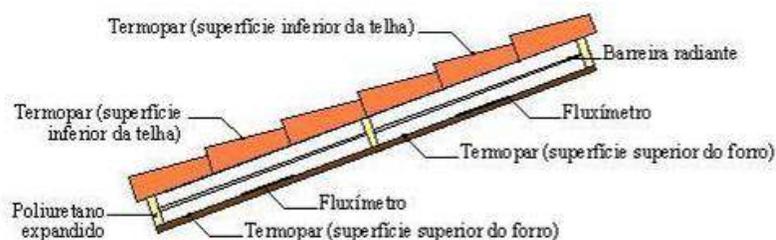


Ilustração 14 - Corte esquemático do telhado

A medição do fluxo de calor e das temperaturas envolvidas (temperaturas superficiais e do ar) em cada amostra foi realizada através de transdutores de fluxo de calor e por termopares, respectivamente. O fluxímetro foi instalado sobre a face superior do forro, conforme indica a Ilustração 15. Para melhorar o contato entre o fluxímetro e o forro, foi inserida pasta térmica entre os dois. Um dos termopares foi

instalado sobre a superfície superior do forro e o outro foi instalado sobre a face inferior da telha em cada seção, como indicado Ilustração 16. Estes equipamentos foram conectados em um DATALOGGER da marca AGILENT, modelo 34970A (resolução de 0,1  $\mu\text{V}$  e incerteza de 0,5). Os dados foram armazenados num intervalo de tempo de 3 minutos durante o período de testes.

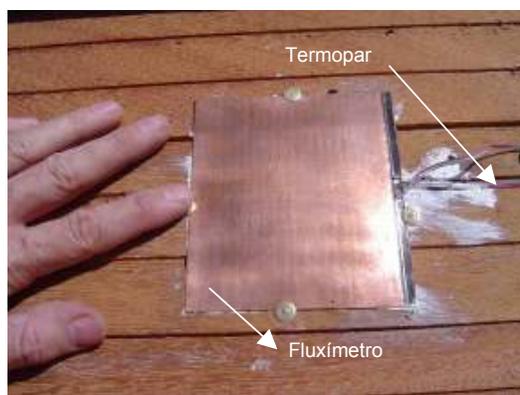


Ilustração 15 – Instalação do transdutor de fluxo de calor e do termopar



Ilustração 16 – Termopar na face inferior da telha

As oito seções receberam diferentes configurações, seja com a presença de isolantes térmicos reflexivos ou apenas com a mudança das telhas existentes, alterando-se a cor e porosidade das mesmas. A Tabela 2, apresenta as características das amostras e do tipo de telha presente em cada seção.

Tabela 2  
Amostras analisadas

Seção	Amostra	Características	Característica da telha
1	-	Padrão (sem manta)	Telha esmaltada cerâmica – cor avermelhada
2	A	Alumínio cozinha	Telha esmaltada cerâmica – cor avermelhada
3	B	Lona plástica preta	Telha esmaltada cerâmica – cor avermelhada
4	J	Manta comercial 1: dupla face aluminizada. Substrato acartonado 0,5 mm	Telha esmaltada cerâmica – cor avermelhada

Tabela 2  
Amostras analisadas (continuação)

Seção	Amostra	Características	Característica da telha
5	D	Manta comercial 2: uma face aluminizada. Substrato polietileno expandido 2 mm	Telha esmaltada cerâmica – cor avermelhada
6	R	Manta 3 (embalagem longa vida): uma face aluminizada. Substrato acartonado + polietileno	Telha esmaltada cerâmica – cor avermelhada
7 <sup>1</sup>	-	Sem manta até junho e com folha de EPS a partir de julho	Telha cerâmica porosa – cor alaranjada até junho e cerâmicas esmaltadas a partir de julho
8	-	Sem manta	Telha esmaltada cerâmica – cor branca

Todas as seções descritas na tabela acima permaneceram sem modificações ao longo de todo o período analisado, exceto a 7. Esta seção, até o mês de junho não tinha manta e as suas telhas eram porosas. No término deste mês, as telhas foram modificadas, reinstalando a configuração original da cobertura (telhas cerâmicas esmaltadas na cor avermelhada) e foi inserida uma manta de EPS, com espessura igual a 10 mm.

A Ilustração 17 mostra os transdutores e os termopares instalados sobre a face superior do forro em cada uma das seções. Em seguida, foram fixadas as mantas sobre as ripas, conforme mostrado na Ilustração 18. A vista geral da cobertura da edificação, depois da montagem do experimento, está representada na Ilustração 19, já com a presença das telhas pintadas de branco e porosas.

A eficiência ( $\eta$ ) de uma barreira radiante pode ser considerada como a razão de energia bloqueada com a aplicação da mesma conforme mostra a Equação 1. A eficiência das barreiras radiantes foi calculada de três formas diferentes. Sendo a primeira referente à energia total ( $J/m^2$ ) que a cobertura ganhou ou perdeu, a qual foi chamada de eficiência energética e foi calculada para o período de perda e para o período de ganho de energia. A segunda maneira de calcular a eficiência considera a média diária do fluxo de calor que a cobertura ganhou e perdeu no

<sup>1</sup> Esta seção permaneceu sem manta até o início do mês de julho, após foi inserida folha de EPS com espessura de 10 mm.

decorrer de um dia. Para este cálculo foram excluídos os valores das 8 horas às 10 horas e das 18 horas às 20 horas. Para alguns dias, esta forma de calcular não forneceu valores de eficiência reais. Quando o fluxo de calor médio foi pequeno nas seções, a eficiência tendeu a apresentar valores irreais.

A última forma de calcular a eficiência é realizada para o horário de pico de cada dia. Assim, foi verificada a eficiência da barreira radiante no momento mais crítico do dia.

Destas três (3) formas de calcular a eficiência, foi considerada como a mais representativa da realidade a primeira maneira, de acordo com a energia total ganhada e perdida pela cobertura.



Ilustração 17 – Vista geral da localização dos transdutores e termopares



Ilustração 18 – Ilustração das seções



Ilustração 19 - Vista do telhado

### 3.3.1 Estimativa do coeficiente de convecção externo

O coeficiente de trocas de calor por convecção na superfície externa do telhado foi estimado através do desenvolvimento de um equipamento, representado esquematicamente na Ilustração 20.

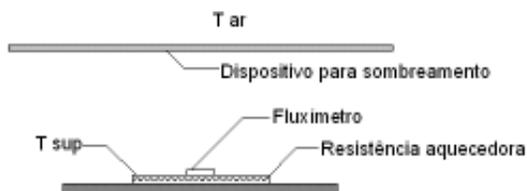


Ilustração 20 - Dispositivo para estimar o  $h_{conv}$  (coeficiente de convecção externo)

A resistência aquecedora gerou uma potência, medida pelo transdutor de fluxo de calor. As temperaturas também foram medidas. Estas variáveis foram inseridas na Equação 26. Pôde-se encontrar o coeficiente de convecção externo ( $h$ ) isolando-o, uma vez que os outros dados são conhecidos.

$$Pot = h_{ext} \times A \times (T_{sup} - T_{ar}) \quad (26)$$

Onde:

Pot - Potência gerada pela resistência (W);

$h_{ext}$  – coeficiente de convecção externo ( $W/m^2K$ );

A – área considerada ( $m^2$ );

$T_{sup}$  – temperatura superficial (K);

$T_{ar}$  – temperatura do ar (K).

### 3.3.2 Comparação teórico/experimental (em campo)

A comparação entre as eficiências teóricas, para os dois modelos matemáticos, e os resultados de eficiência obtidos experimentalmente *em campo* foi realizada com o intuito de verificar qual foi o método de cálculo que mais se assemelhou com a situação real em uma cobertura.

A eficiência experimental foi calculada para um dia de cada mês de medição, de fevereiro a agosto. Os dias escolhidos foram os seguintes: dia 22/2, 6/3,

15/4, 14/5, 1/6, 31/7 e 9/8, por terem apresentado a radiação solar mais intensa do mês em questão.

Valores de temperatura do ar, radiação solar, coeficiente de convecção externo e diferença de temperatura, obtidos com as medições do ensaio *em campo*, foram reproduzidos nos modelos matemáticos para a diferença de temperatura e potência dissipada constante.

### **3.3.3 Comparação experimental (em campo) x experimental (laboratório)**

Através da comparação experimental em campo e experimental em laboratório, para os modos de medição 1 e 2 (diferença de temperatura constante e potência dissipada) pôde-se confirmar qual foi o modo de medição que forneceu os resultados mais condizentes com a realidade. A partir deste resultado, definiu-se o modo de medição do fluxo de calor na bancada experimental que forneceu valores de eficiência mais próximos transferência de calor um telhado real (medição em campo).

## APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 RESULTADOS DO MODELO MATEMÁTICO

De acordo com equações apresentadas no Capítulo 3, as resistências térmicas formadas através da transferência de calor por radiação, convecção e condução para o modelo 1 ( $\Delta T$  constante) foram calculadas e estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3  
Resistências térmicas utilizadas para o cálculo do fluxo de calor do modelo 1

Amostra	Configuração	Resistência Térmica ( $m^2 K/W$ )				
		$R_{convA}$	$R_{radA}$	$R_{manta}$	$R_{convb}$	$R_{radb}$
-	Caso padrão (sem manta)	1,74	0,16	-	-	-
A	Al polido	0,87	3,7	0	0,87	3,7
B	Lona preta	0,87	0,16	0	0,87	0,16

O modelo 2 considerou uma potência constante dissipada na superfície das telhas. Desta forma, neste modelo foram consideradas as resistências térmicas formadas pelas trocas de calor na superfície externa das telhas e na face inferior do

forro. Os valores destas resistências foram adquiridos através da (NBR 15220-2), para superfícies horizontais com fluxo de calor no sentido descendente. As demais resistências formadas no interior do aparato, advindas das trocas de calor por radiação, convecção e condução foram calculadas separadamente, assim como no modelo 1 e estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4  
Resistências térmicas utilizadas para o cálculo do fluxo de calor do modelo 2

Amostra	Configuração	Resistência Térmica (m <sup>2</sup> K/W)							
		R <sub>convext</sub>	R <sub>telha</sub>	R <sub>convA</sub>	R <sub>radA</sub>	R <sub>manta</sub>	R <sub>convb</sub>	R <sub>radb</sub>	R <sub>convint</sub>
-	Caso padrão (sem manta)	0,04	0,01	1,74	0,14	-	-	-	0,23
A	Al polido	0,04	0,01	0,87	3,4	0	0,87	3,4	0,23
B	Lona preta	0,04	0,01	0,87	0,14	0	0,87	0,14	0,23

Observou-se que para os dois modelos, a resistência térmica por convecção foi a mesma, em função do número de *Nusselt* ser igual a 1 e da camada de ar apresentar a mesma espessura para os dois modelos. Já a resistência térmica por radiação não foi a mesma para as amostras analisadas. Quanto menor o valor da emissividade da barreira radiante, maior é a resistência térmica por radiação. Como por exemplo, pode-se citar a amostra A ( $\epsilon = 0,05$ ), onde a resistência térmica por radiação no interior do dispositivo experimental atingiu o valor de 3,7 m<sup>2</sup> K/W e 3,4 m<sup>2</sup> K/W para modelos 1 e 2, respectivamente. Já na amostra B (lona preta), cujas superfícies possuíram emissividade igual a 0.9, a resistência térmica por radiação foi pequena, atingindo o valor de 0,16 m<sup>2</sup> K/W e 0,14 m<sup>2</sup> K/W, para os modelos da  $\Delta T$  constante e da potência dissipada constante, respectivamente. Através deste cálculo foi possível observar que os isolantes térmicos reflexivos dificultam a transferência do calor por radiação.

A resistência térmica total, referente à resistência térmica equivalente das trocas de calor por convecção e radiação no interior do dispositivo experimental, foi calculada para os modelos 1 e 2. No modelo da diferença de temperatura constante, a resistência térmica para o alumínio de cozinha atingiu 0,7 m<sup>2</sup>K /W e para o modelo da potência dissipada constante este valor chegou a 0,69 m<sup>2</sup>K/W. A resistência térmica indicada pela NBR 15220-2, para câmaras de ar de 2 a 5 cm de espessura e superfícies com emissividade de 0,05 a 0,2 é de 0,63 m<sup>2</sup>K/W. O valor calculado

nesta pesquisa não diferiu significativamente dos tabelados na norma, uma vez que não se sabe exatamente com qual valor de emissividade foi calculada a resistência térmica na norma.

#### 4.1.1 Avaliação dos modos de medição e comparação teórico/experimental

Os resultados obtidos neste ensaio permitiram verificar se a eficiência do alumínio de cozinha e da lona plástica preta alterava-se de acordo com modo de medição. Para tanto, mediu-se o fluxo de calor para três diferenças de temperatura e para três potências dissipadas. Os resultados referentes às medições do fluxo de calor para o primeiro modelo ( $\Delta T$  constante) estão listados na Tabela 5 e os valores da eficiência calculados para as duas mantas estão ilustrados na Tabela 6.

Tabela 5

Fluxo de calor perante o modelo da diferença de temperatura constante

Configurações	Fluxo de Calor (W/m <sup>2</sup> )		
	Nada	Alumínio cozinha	Lona plástica preta
$\Delta t$ 10	23,6	2,8	12,3
$\Delta t$ 20	60,4	5,4	31,6
$\Delta t$ 40	146,2	10,7	71,9

Tabela 6

Eficiência das mantas perante o modelo da diferença de temperatura constante

	Eficiência experimental (%)	
	Alumínio cozinha	Lona plástica preta
$\Delta t$ 10	88	48
$\Delta t$ 20	91	48
$\Delta t$ 40	93	51

As medições com o  $\Delta T$  constante mostraram que conforme o acréscimo da diferença de temperatura houve um acréscimo na eficiência das amostras, apesar desta variação ter sido pequena.

Os resultados para os ensaios de acordo com o modelo 2, potência dissipada constante, estão ilustrados na Tabela 7 e na Tabela 8. A primeira mostra a redução na transferência do fluxo de calor com a aplicação de uma manta e a

segunda evidência as eficiências das mantas obtidas para a potência mantida em  $120 \text{ W/m}^2$ ,  $275 \text{ W/m}^2$  e  $590 \text{ W/m}^2$ .

Tabela 7

Passagem do fluxo de calor perante o modelo da potência dissipada constante

Configurações	Fluxo de Calor ( $\text{W/m}^2$ )		
	Nada	Alumínio cozinha	Lona plástica preta
120	49,4	7,2	35,1
275	108,0	16,1	77,1
590	228,5	27,8	161,3

Tabela 8

Eficiência das mantas perante o modelo da potência dissipada constante

Modo de Medição	Eficiência (%)	
	Alumínio cozinha	Lona plástica preta
Potência $120 \text{ W/m}^2$	85	29
Potência $275 \text{ W/m}^2$	85	29
Potência $590 \text{ W/m}^2$	88	29

Através do modelo da potência dissipada constante, verificou-se que o valor das eficiências permaneceu em torno de 85% para o alumínio polido nas medições com a potência de  $120 \text{ W/m}^2$  e  $275 \text{ W/m}^2$ . Com a potência de  $590 \text{ W/m}^2$ , a eficiência mostrou uma ligeira melhora. As eficiências, calculadas para as três potências dissipadas, da manta formada pelo alumínio pintado de preto permaneceram em torno de 29%. Este resultado mostrou que as eficiências das mantas analisadas sofreram pouca interferência com o acréscimo na radiação dissipada em sua superfície.

O modo de medição com o  $\Delta T$  constante pode oferecer valores superestimados, por não considerar uma potência que simule a radiação solar, por não considerar as trocas de calor por convecção nas faces externas do dispositivo experimental e por não considerar as resistências térmicas por condução no interior das telhas e do forro.

As eficiências das barreiras radiantes obtidas com o modelo 2, potência dissipada constante, apresentam valores mais próximos da realidade quando comparadas com as eficiências resultantes do modelo 1, da diferença de

temperatura constante. No entanto, as medições utilizando o segundo modelo levaram muito tempo para estabilizar o fluxo de calor no aparato experimental. Cada medição durou mais de 40 minutos.

A Tabela 9 mostra os resultados dos ensaios para algumas mantas com base no modelo 1 (diferença de temperatura constante). A diferença de temperatura adotada para esta medição foi de 25°C. A eficiência ( $\eta_{\Delta T}$ ) foi determinada de forma experimental, através da Equação 1, e também analiticamente, através da Equação 10. Para as trocas radiantes foi considerado o modelo de placas planas paralelas infinitas, dado ao aspecto do dispositivo.

Tabela 9  
Eficiência experimental e teórica para o modelo 1

Amostra	Configuração	Resultados Experimentais			Resultados teóricos
		Fluxo de calor (W/m <sup>2</sup> )	Diferença de temperatura (K)	Eficiência experimental ( $\eta_{\Delta T}$ ) (%)	Eficiência teórica ( $\eta_{\Delta T}$ ) (%)
-	Caso padrão (sem manta)	146,2	25,3	-	-
A	Al polido	10,7	24,9	91	89
B	Lona plástica preta	71,9	25,2	50	49

Através da comparação entre as eficiências foi possível verificar boa concordância entre os valores teóricos e experimentais nas amostras, evidenciando o bom desempenho do aparato experimental. Com a inserção da manta. As duas amostras analisadas reduziram a transferência de calor através do dispositivo experimental, sendo que a amostra A reduziu em 91% a transferência de calor para o ambiente interno. A amostra B obteve a eficiência experimental de 50%.

Os resultados obtidos com o modelo 2 (potência dissipada constante) estão descritos na Tabela 10.

Tabela 10

Eficiência experimental e teórica para o modelo 2 (potência dissipada de 275 W/m<sup>2</sup>)

Amostra	Configuração	Resultados Experimentais			Resultados teóricos
		Fluxo de calor (W/m <sup>2</sup> )	Diferença de temperatura (K)	Eficiência experimental ( $\eta_{Pot}$ ) (%)	Eficiência teórica ( $\eta_{Pot}$ ) (%)
-	Caso padrão (sem manta)	108	19,8	-	-
A	Al polido	16,1	27,3	85	82
B	Lona plástica preta	77,1	35,8	29	34

Para este modo de medição, os resultados teóricos diferiram ligeiramente dos experimentais, porém apresentaram boa concordância entre si. O alumínio de cozinha foi mais eficiente do que a lona plástica preta. O primeiro atingiu eficiência experimental de 85% e o segundo obteve eficiência de 29%. Ainda neste modelo, foi observado que os valores das eficiências foram menores quando comparados com o modelo 1. Esta redução da eficiência no modelo 2, possivelmente foi provocada pelo aumento na temperatura superficial das telhas causado pela presença do isolante térmico.

#### **4.2 AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE BARREIRAS RADIANTES ENCONTRADAS NO MERCADO DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

As eficiências de quinze (15) barreiras radiantes encontradas no mercado da construção civil de Florianópolis e de duas (2), formadas pela união das embalagens de leite longa vida, estão descritas na Tabela 11. O fluxo de calor neste ensaio foi realizado de acordo com o modelo 1, da diferença de temperatura constante ( $\Delta T = 20$  °C).

Tabela 11  
Eficiência das barreiras radiantes

Resultados experimentais em laboratório			
Amostra	Fluxo de calor (W/m <sup>2</sup> )	Diferença de temperatura	$\eta_{\Delta T}$ (%)
Sem BR	100,0	20,7	-
C	35,7	20,8	62
D	34,7	20,8	64
E	33,2	20,6	68
F	33,5	20,7	70
G	31,2	22,3	71
H	32,7	20,8	67
I	10,7	20,6	83
J	10,5	20,6	88
K	9,8	20,6	82
L	32,0	20,6	69
M	29,9	20,7	69
N	11,0	20,8	88
O	22,0	20,8	77
P	11,0	20,6	79
Q	10,1	20,6	87
R	27,2	20,7	73
S	12,2	20,6	85

Através deste resultado, observou-se que, no geral, a eficiência das barreiras radiantes variou entre 62% e 88%, evidenciando uma grande diferença no desempenho térmico das mesmas. Esta diferença, considerada representativa entre as amostras analisadas, deve-se principalmente à composição da manta, ou seja, aos materiais que a formam, já que a parte aluminizada de algumas barreiras radiantes é formada por um polímero aluminizado (“papel bala”), e não o alumínio propriamente dito. Outra diferença que pode interferir na eficiência da barreira radiante é a presença de uma camada de polietileno sobre a superfície aluminizada, como foi observado no caso das embalagens de leite longa vida (mantas R e S). Quando se retirou o polietileno existente sobre o alumínio, a eficiência da manta aumentou 12%. Assim, o uso deste material em habitações de caráter popular deve ser incentivado, pois se trata de um resíduo sólido urbano e seu desempenho é superior a algumas mantas (com camada de polietileno) e compatível com as

melhores barreiras radiantes encontradas comercialmente (sem camada de polietileno). Apesar do bom desempenho das mantas formadas pelas embalagens longa vida, ainda são necessários ensaios relacionados a durabilidade deste material.

As mantas que apresentaram eficiências maiores foram as amostras I, J, K, N, O, P e Q, as quais obtiveram a eficiência entre 77% e 88%. Estas barreiras radiantes normalmente apresentaram aspecto semelhante: folha de alumínio, seguido por algum tipo de reforço mecânico (formado por polietileno ou plástico a base de poliuretano e/ou papel Kraft). Algumas destas amostras apresentaram as duas faces aluminizadas.

As amostras C, D, E, F, G, H, L e M atingiram a eficiência entre 60 e 70%. A eficiência destas amostras foi inferior em relação às demais devido à qualidade do alumínio empregado na (s) face (s) das mantas. Estas mantas possuem o aspecto de uma barreira radiante, porém apresentam o valor da emissividade superior em relação as demais mantas. Desta forma, o desempenho térmico destas mantas foi prejudicado, ocasionando a passagem do calor para o interior da residência com maior intensidade do que nas mantas de boa qualidade.

A emissividade das barreiras radiantes foi estimada através dos resultados obtidos experimentalmente e do modelo matemático, devido não se disponibilizar de um equipamento para medir este valor. Desta forma, a eficiência obtida experimentalmente foi reproduzida teoricamente (no software EES), através da variação do valor da emissividade. A emissividade foi alterada até se atingir o valor de eficiência teórica igual à eficiência experimental. Como havia mais de uma manta do mesmo fabricante, muitas vezes o valor da emissividade estimada não foi o mesmo em todas as mantas deste fabricante, como foi o caso da empresa 1. Assim, para obter um valor de emissividade que caracterizasse um fabricante, foi calculada a média da emissividade das mantas e, assim, definiu-se um valor de emissividade para cada fabricante, conforme mostra a Tabela 12.

Tabela 12  
Estimativa da emissividade das barreiras radiantes

Fabricante	Amostra	Emissividade estimada para cada manta	Emissividade média estimada para cada fabricante
Al cozinha	A	0,04	0,04
Lona plástica preta	B	0,90	0,90
1	C	0,50	0,54
	D	0,51	
	E	0,56	
	F	0,51	
	G	0,60	
2	H	0,48	0,48
3	I	0,08	0,06
	J	0,06	
	K	0,04	
4	L	0,35	0,40
	M	0,45	
5	N	0,06	0,06
6	O	0,12	0,12
7	P	0,09	0,09
	Q	0,09	
Embalagem longa vida	R	0,23	0,23
	S	0,04	0,04
Isopor (e=10 mm)	T	0,90	0,90

Através da estimativa da emissividade das barreiras radiantes encontradas no mercado da construção civil, foi verificado que este valor variou significativamente nas amostras analisadas neste trabalho: de 0,04 a 0,53. Assim, verificou-se que muitas destas mantas não podem ser consideradas como barreiras radiantes, uma vez que a emissividade da superfície aluminizada foi superior a 0,1 (FAREY, 1994 a).

O fabricante 1 apresentou superfície aluminizada com a maior emissividade de todas as barreiras radiantes testadas, cuja emissividade alcançou 0,54. Outros fabricantes que também apresentam o valor de emissividade

considerado alto foi o 2 e o 4, que apresentaram este valor estimado em 0,48 e 0,40, respectivamente.

As barreiras radiantes dos fabricantes 3, 5, 6 e 7 apresentaram os menores valores de emissividade, que variou de 0,06 a 0,12. Estas mantas foram as que apresentaram as melhores eficiências em relação às demais.

Em relação às mantas R e S (embalagens longa vida), observou-se que uma camada de polietileno aderida sobre a face aluminizada da manta elevou a emissividade do sistema. Com a camada de polietileno a emissividade foi estimada em 0,23. Sem esta camada a emissividade foi 0,04, mostrando que um material aderido sobre a face aluminizada da barreira radiante prejudica o seu desempenho.

#### 4.2.1 Análise do efeito da poeira sobre a superfície da barreira radiante

A quantidade de poeira sobre a face aluminizada da barreira radiante foi obtida através das lâminas retiradas de cada uma das amostras. A quantidade de poeira foi mensurada em porcentagem (%), pelo software *Motic Images Advanced 3.1*. A Ilustração 21, Ilustração 22, Ilustração 23, Ilustração 24, Ilustração 25, Ilustração 26, Ilustração 27, Ilustração 28, Ilustração 29, Ilustração 31 e Ilustração 32 mostram as imagens capturadas no microscópio para amostras 2, 3 e 4, juntamente com a quantidade de poeira sobre a superfície.

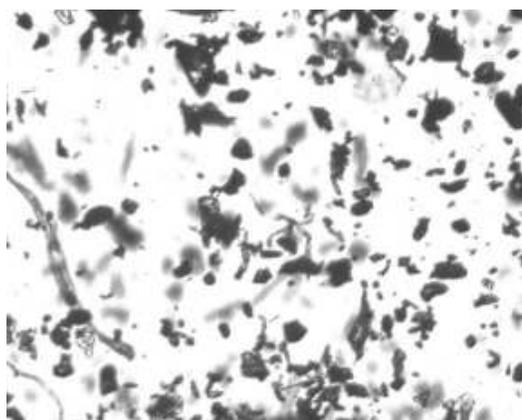


Ilustração 21 - Amostra 2a

Características:

Quantidade de poeira sobre a imagem –  
25,9%

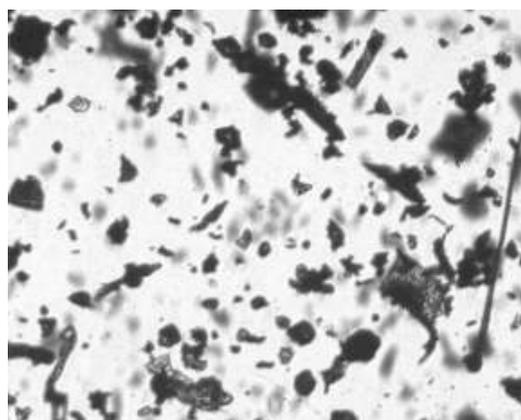


Ilustração 22 - Amostra 2b

Características:

Quantidade de poeira sobre a imagem – 27%

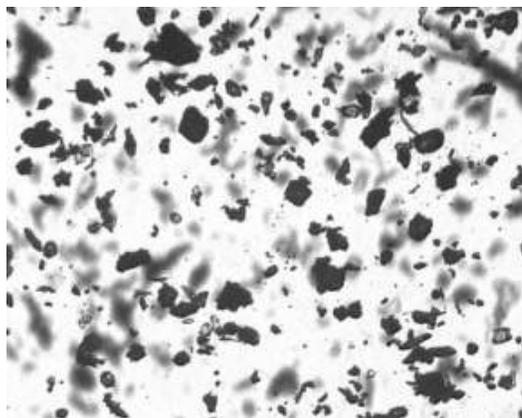


Ilustração 23 - Amostra 2c

Características:

Quantidade de poeira sobre a imagem – 28%

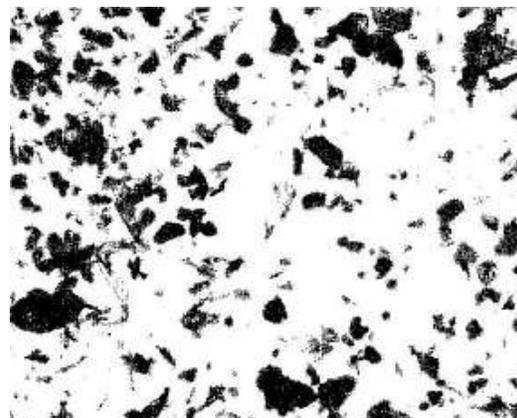


Ilustração 24 - Amostra 2d

Características:

Quantidade de poeira sobre a imagem –  
19,8%

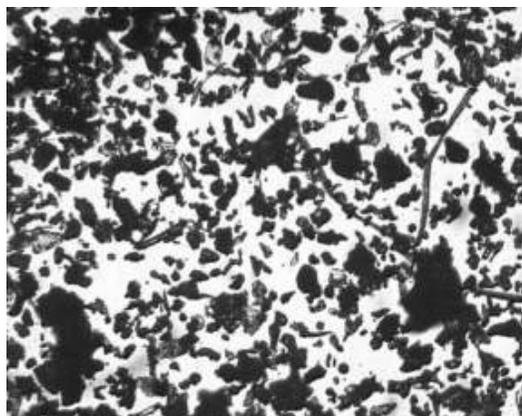


Ilustração 25 - Amostra 3a

Características:

Quantidade de poeira sobre a imagem –  
55,48%



Ilustração 26 - Amostra 3b

Características:

Quantidade de poeira sobre a imagem – 58%

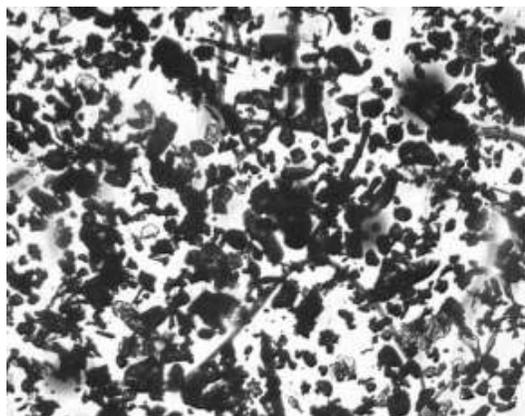


Ilustração 27 - Amostra 3c

Características:

Quantidade de poeira sobre a imagem –  
58,16%

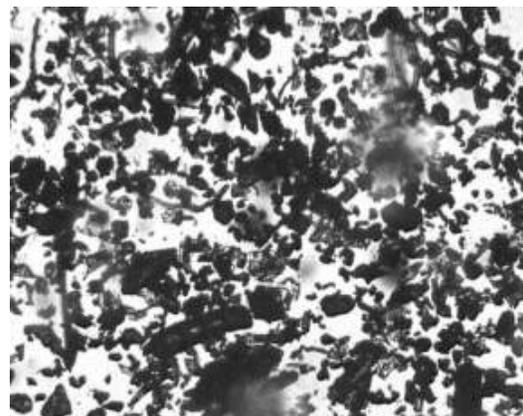


Ilustração 28 - Amostra 3d

Características:

Quantidade de poeira sobre a imagem –  
61,16%

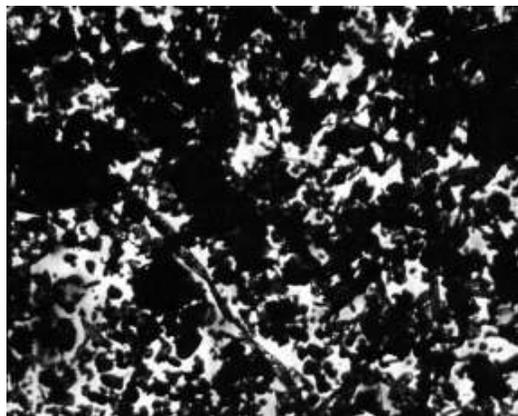


Ilustração 29 - Amostra 4a

Características:

Quantidade de poeira sobre a imagem –  
79,08%



Ilustração 30 - Amostra 4b

Características:

Quantidade de poeira sobre a imagem –  
86,31%

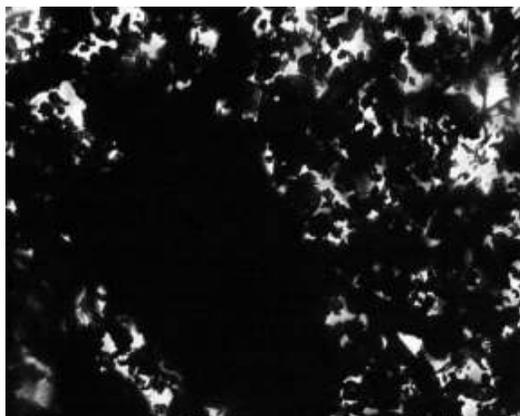


Ilustração 31 - Amostra 4c

Características:

Quantidade de poeira sobre a imagem –  
88,67%

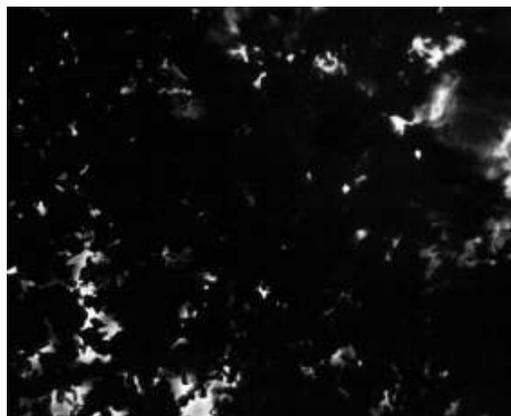


Ilustração 32 - Amostra 4d

Características:

Quantidade de poeira sobre a imagem –  
93,62%

Na Tabela 13 estão apresentados os resultados do cálculo para a quantidade média de poeira sobre a face aluminizada das amostras 1, 2, 3 e 4. Esta tabela mostra que na amostra 2 a quantidade de poeira sobre a face aluminizada foi de 25%. Para a amostra 3 este percentual foi de 58% e, na última amostra, a quantidade total de poeira depositada sobre a superfície foi de aproximadamente 87%.

Tabela 13

Quantidade média de poeira para as amostras 1, 2, 3 e 4.

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
Quantidade média de poeira sobre a imagem (%)	0	25	58	87

Após a quantificação de poeira depositada nas amostras, foram realizados ensaios para medir o fluxo de calor que ultrapassou o aparato experimental. Estes valores estão ilustrados na Tabela 14, bem como a eficiência das amostras analisadas e a redução na eficiência destas mantas em relação à amostra 1.

Tabela 14  
Redução da eficiência das barreiras radiantes

Amostra	Fluxo de calor (W/m <sup>2</sup> )	Eficiência (%)	Redução da eficiência (%) <sup>2</sup>
Sem manta	88,3	-	-
BR sem poeira	10,9	88,0	-
BR com 25% de poeira	22,5	75,0	13
BR com 58% de poeira	34,4	61,0	27
BR com 87% de poeira	44,4	49,6	38
BR pintada de preto	43,9	50,2	37

Observou-se que conforme o nível de poeira era aumentava, maior era o fluxo de calor que atravessou o dispositivo experimental e, conseqüentemente a eficiência da barreira radiante diminuiu. Este fato deve-se ao aumento da emissividade da superfície da barreira radiante, pois a poeira ( $\epsilon = 0,9$ ) recobre a face aluminizada, aumentando as trocas de calor no sistema da cobertura. A barreira radiante com 0% poeira alcançou uma eficiência de 88%. A manta com 25% de poeira atingiu uma eficiência de 75%. Na amostra 3, com a poeira recobrindo 58% da superfície da manta, e a eficiência alcançou 61%. A eficiência da manta com 87% de poeira foi muito parecida com a eficiência de uma barreira radiante que recebeu tinta preta sobre a sua superfície, as quais reduziram a passagem de calor em torno de 50%.

Verificou-se que a redução na eficiência da amostra 4 atingiu 38%. Desta forma, este experimento evidenciou o efeito do depósito de poeira na superfície de baixa emissividade da manta. Quanto maior a quantidade de poeira sobre a mesma, maior será a passagem do fluxo de calor para o interior da edificação e menor será a eficiência da barreira radiante. Isto ocorreu devido ao acréscimo no valor da emissividade da mesma.

A emissividade das amostras 2, 3 e 4 foi estimada de acordo com a emissividade da poeira, supondo que uma barreira radiante totalmente encoberta

<sup>2</sup> Em relação à barreira radiante sem poeira.

por este elemento possui  $\epsilon = 0,9$ . Os valores de emissividade estimados estão apresentados na Tabela 15.

Com base na estimativa apresentada na Tabela 15, verificou-se que a amostra 2, com 25% de poeira, apresentou aumento no valor da emissividade em 0,14, em relação a amostra 1. Na amostra 3, este acréscimo foi da ordem de 0,43. Em relação à manta com maior quantidade de poeira, a amostra 4, o acréscimo no valor da emissividade da manta foi igual a 0,68. Este resultado evidenciou que a emissividade aumenta de acordo com o acréscimo da quantidade de poeira sobre a face aluminizada da barreira radiante, uma vez que sobre a superfície da baixa emissividade foi adicionada uma camada de poeira, que possui este valor superior ao do alumínio presente na barreira radiante.

Tabela 15  
Estimativa da emissividade da superfície da barreira radiante

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5
% de poeira	0	25	58	87	0 (BR pintada de preto)
Emissividade ( $\epsilon$ )	0,09	0,23	0,52	0,77	0,9

Este ensaio foi realizado para demonstrar o cuidado que se deve ter ao instalar a barreira radiante. Se a manta apresentar somente uma face aluminizada, esta deve ser instalada com o alumínio voltado para baixo, assim, não ocorrerá o depósito de poeira sobre a face aluminizada. Se a manta apresentar os dois lados aluminizados, inicialmente ela será mais eficiente do que a barreira radiante de uma face aluminizada. Porém, a tendência é a eficiência da manta dupla face se igualar com a manta simples face, em função de ocorrer depósito de poeira na face superior da barreira radiante.

#### **4.3 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES EM CAMPO**

Os resultados foram analisados para três dias diferentes, no que se refere a radiação solar e temperatura do ar. O primeiro dia escolhido foi o dia 22/2/2006, um dia crítico de verão, com temperatura externa máxima de 31,5 °C e temperatura média diária de 25 °C. O segundo, foi o dia 21/5/2006, na estação de outono

(temperatura média externa igual a 18,5° C). Este dia foi escolhido por apresentar pouca radiação solar, uma vez que havia muita nebulosidade no céu. E, por último, foi escolhido o dia 31/7/2006, pois a temperatura do ar foi baixa em relação aos outros dias do inverno, atingindo a temperatura externa mínima de 6°C e máxima de 17 °C.

Desta forma, nesta parte da pesquisa, estão apresentados os resultados das medições para o fluxo de calor, para a temperatura superficial das telhas e do forro e o cálculo da eficiência das seções analisadas.

#### **4.3.1 Fluxo de calor**

A Ilustração 33 mostra o fluxo de calor que atingiu a superfície do forro no decorrer do dia 22 de fevereiro, um dia típico de verão com forte radiação solar e temperaturas altas. O horário de pico ocorreu às 13 horas e o fluxo de calor máximo na seção 1 foi de 82,4 W/m<sup>2</sup>. Para este mesmo horário, as seções que mais reduziram a passagem do calor foram a 4 (manta comercial 1) e 2 (Al de cozinha). A primeira apresentou a maior redução, permitindo a passagem de apenas 22,5 W/m<sup>2</sup> para o interior da edificação, e a segunda transferiu 31 W/m<sup>2</sup>. As demais seções também diminuíram a transferência de calor, porém, permitiram que uma quantidade maior atingisse o ambiente interno em relação às seções 2 e 4.

Observou-se que a seção 6, formada pela manta das embalagens longa vida com a camada de polietileno sobre a superfície aluminizada, obteve melhor desempenho do que a manta comercial presente na seção 5. O fluxo de calor que atingiu o transdutor de fluxo de calor na seção 6 foi de 43 W/m<sup>2</sup>, enquanto que este valor para a seção 5 foi de 50 W/m<sup>2</sup>. Desta forma, a seção 6 reduziu 7 W/m<sup>2</sup> a mais do que a 5, para o dia 22 de fevereiro. Este resultado mostrou que algumas mantas comercializadas no Brasil não são exatamente barreiras radiantes, uma vez que deveriam apresentar melhor desempenho térmico. Este fato foi atribuído à composição da barreira radiante, pois o material que deveria ter baixa emissividade, não é exatamente o alumínio, mas sim um polímero aluminizado. Outro fator que influenciou do desempenho foi a presença de um filme de polietileno sobre a face aluminizada da barreira radiante.

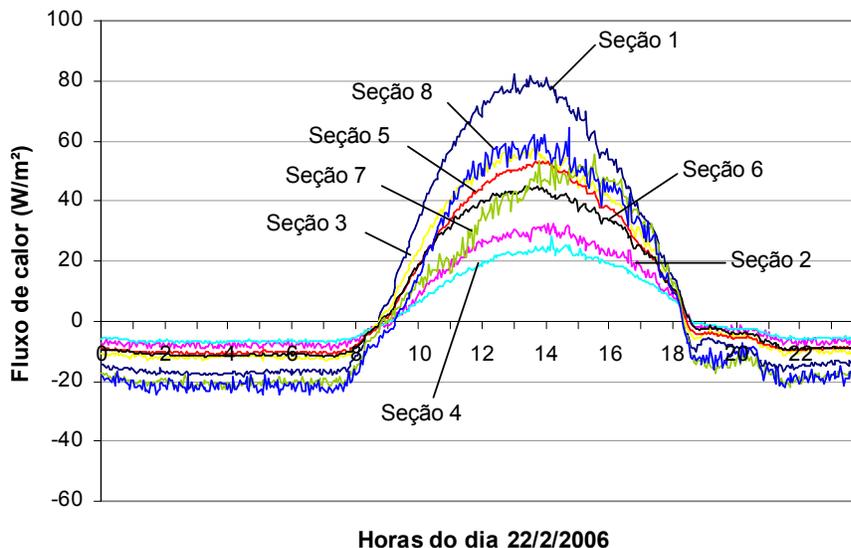


Ilustração 33 - Variação do fluxo de calor durante o dia 22/2/06

As seções 7 e 8 não continham isolante térmico, porém, apresentaram redução do fluxo de calor para o período de ganho de energia. Na seção 7 este fato deve-se às telhas serem porosas, onde parte da radiação solar foi gasta no processo de evaporação da água que penetra no interior das mesmas, devido à condensação do vapor de água presente no ar sobre a superfície das telhas durante a noite. Desta forma, as telhas começam transferir calor somente depois de terminado este processo. Em relação à seção 8, a redução no fluxo de calor ocorreu em função da absorvidade da superfície externa das telhas, pintadas de branco ( $\alpha=0,2$ ), ter sido menor em relação as telhas cerâmicas existentes nas outras amostras ( $\alpha=0,65$ ).

Nesta mesma figura, também foi possível verificar que houve redução nas perdas de calor durante o período noturno provocado pela presença das barreiras radiantes. A redução das perdas de calor não foi verificada nas seções 7 e 8, uma vez que perderam mais calor para o ambiente externo do que a seção mantida como padrão (seção 1).

A Ilustração 34 mostra a variação do fluxo de calor para o dia 21 de maio de 2006. Durante este dia a cobertura da edificação perdeu calor em todas as seções em função da radiação solar não ter sido intensa, uma vez que o dia permaneceu inteiramente nublado e com períodos de chuva.

Devido o fluxo de calor nas oito seções analisadas não terem diferido significativamente entre si, no gráfico, além da amostra padrão, está apresentada a

seção que mais contribuiu para a redução da transferência de calor e a seção que permitiu maior perda de calor ao ambiente externo. A amostra que mais contribuiu para esta redução foi a manta comercial 1 (seção 4), seguida pelo alumínio de cozinha (seção 2). As seções 3, 5 e 6 reduziram de forma parecida as perdas. Nas seções 7 e 8, houve acréscimo das perdas de calor através da cobertura em relação a amostra padrão (seção 1).

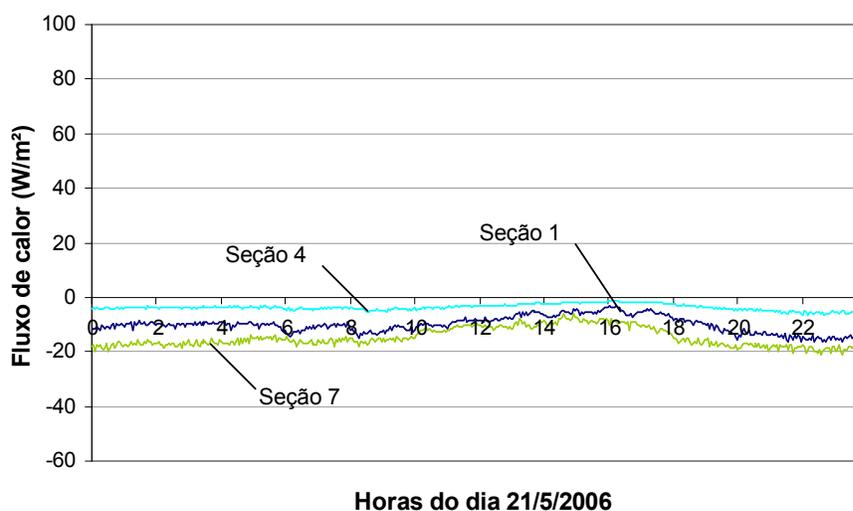


Ilustração 34 - Variação do fluxo de calor durante o dia 21/5/06

Durante o dia 31 de julho, verificou-se que o fluxo de calor máximo que atingiu o transdutor na seção 1 foi menor em relação ao dia 22 de fevereiro, em função da radiação solar incidente sobre a superfície do telhado ter sido menor neste dia, conforme mostra a Ilustração 35.

Neste mês, houve a presença de uma folha de EPS de espessura igual a 10 mm na seção 7 e as telhas desta seção foram substituídas pelas originais da cobertura: cerâmicas esmaltadas com coloração avermelhada.

Na seção 1, houve a passagem de 64 W/m<sup>2</sup> para o horário de pico, que ocorreu às 11 horas e 49 minutos. Na seção 2, que obteve a maior redução, o fluxo de calor máximo atingiu 19 W/m<sup>2</sup> e na seção 4 este valor foi de 20 W/m<sup>2</sup>. Com o uso da folha de EPS (seção 7), o fluxo de calor foi de 27,3 W/m<sup>2</sup>. As seções 5 e 6, permitiram a passagem de 35 e 30 W/m<sup>2</sup>, evidenciando novamente que a manta comercial 2 não foi tão eficaz em reduzir a transferência de calor. As seções 3 e 8 apresentaram redução de fluxo de calor parecidos durante o horário de ganho de

energia e permitindo a passagem de aproximadamente  $40 \text{ W/m}^2$  para o horário de pico.

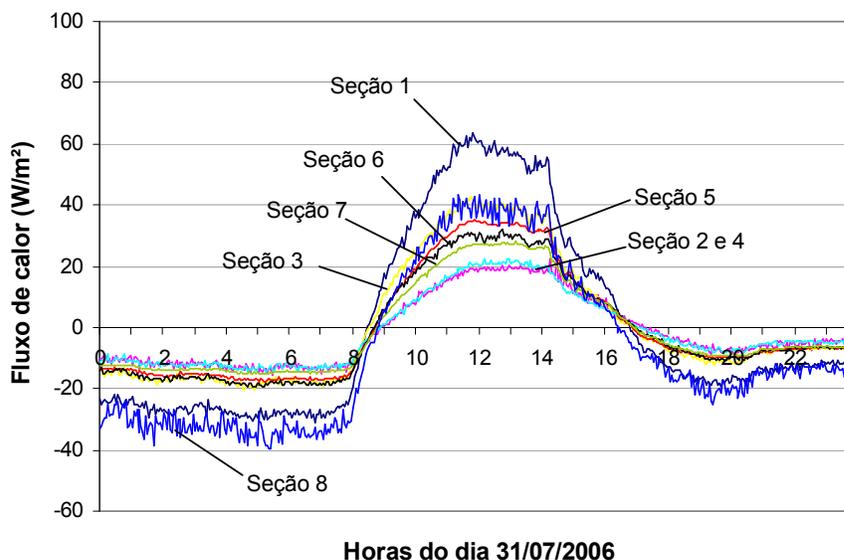


Ilustração 35 - Variação do fluxo de calor durante o dia 31/7/06

Conforme visto nestas figuras, a simples presença de uma manta, sem necessariamente ser uma barreira radiante (seção 3), já reduz o fluxo de calor durante o dia, em função de formar duas camadas de ar ao invés de somente uma. Ou seja, a formação desta outra camada de ar aumentou a resistência térmica do sistema da cobertura. Com a presença de uma barreira radiante, a redução no fluxo de calor é ainda maior, pois eleva a resistência térmica da transferência de calor por radiação. A presença da barreira radiante dificultou tanto os ganhos de calor durante os dias quentes e ensolarados quanto às perdas térmicas durante o período noturno, nos dias frios ou com muita nebulosidade.

As barreiras radiantes têm a função de restringir a transferência de calor em onda longa. Durante o dia, o sentido deste fluxo é das telhas para o ambiente interno. Já durante o período da noite, ocorre o oposto, a presença da barreira radiante reduz a passagem do calor proveniente do interior da edificação para o ambiente externo. Nas seções 7 e 8, com telhas porosas e pintadas de tinta branca, a temperatura superficial do forro e das telhas diminuiu em relação à seção padrão, havendo maior perda de calor para o exterior.

#### 4.3.2 Temperatura superficial das faces inferior das telhas e superior do forro

Os gráficos que apresentam a variação da temperatura superficial das telhas ao longo dos dias analisados estão apresentados na Ilustração 36, Ilustração 38 e Ilustração 40. Já as variações da temperatura superficial do forro estão mostradas na Ilustração 37, Ilustração 39 e Ilustração 41. As temperaturas foram medidas na face superior do forro e na face inferior das telhas, onde estavam localizados os termopares.

As temperaturas superficiais das telhas e do forro nas seções para o dia 22 de fevereiro estão ilustradas na Ilustração 36 e na Ilustração 37, respectivamente. De acordo com estas figuras observou-se que, nas seções que continham mantas, a temperatura superficial das telhas apresentou elevação. A seção que apresentou a maior temperatura superficial durante o horário de pico foi a 2 (alumínio de cozinha), aumentando 4,5°C em relação a seção 1. A seção 4 (manta comercial 1) elevou a temperatura das telhas em 3,6 °C. Estas duas amostras foram as que apresentaram os maiores acréscimos na temperatura superficial das telhas e também foram as que mais reduziram a temperatura superficial do forro, em função destas duas amostras terem apresentado o melhor desempenho térmico em relação às outras.

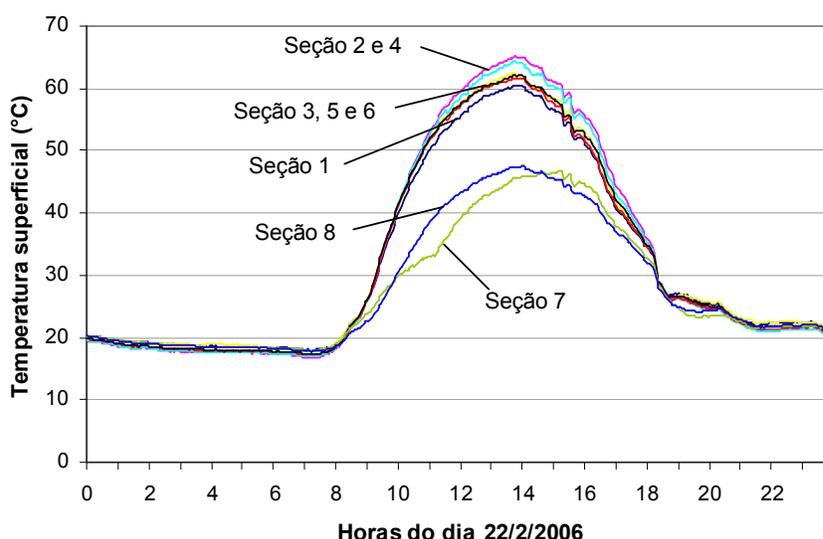


Ilustração 36 - Variação das temperaturas superficiais da telha - dia 22/2/2006

A temperatura superficial superior do forro, representada na Ilustração 37, apresentou redução máxima de 8,3°C na seção 4 (manta comercial 1) e de 7,1°C na

seção 2 (Alumínio de cozinha). Estas duas seções foram as que transferiram menor quantidade de calor em direção ao forro da edificação, conseqüentemente a temperatura superficial do forro apresentou maior redução em relação a seção 1.

Nas seções em que não houve a presença de mantas, as temperaturas superficiais, tanto das telhas quanto do forro, apresentaram significativa redução para o período de ganho de energia (das 8 horas às 18 horas). Na seção 7 a redução na temperatura das telhas foi de 15,7°C e na seção 8, foi de 12,9°C. Assim, houve menor transferência de calor em direção ao forro nestas seções em relação a seção 1. A temperatura superior do forro apresentou reduções: na seção 7 a redução atingiu 6,3°C e na seção 8, este valor foi de 4,8°C.

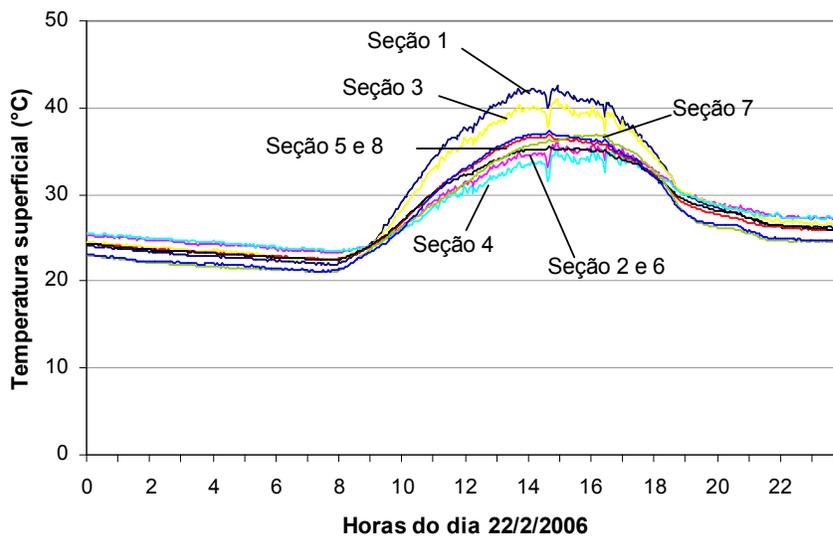


Ilustração 37 - Variação das temperaturas superficiais do forro - dia 22/2/2006

A Ilustração 38 mostra a variação da temperatura superficial das telhas para o dia 21/05. Como neste dia as telhas das seções apresentaram praticamente a mesma temperatura, as linhas que representam as seções ficaram sobrepostas no gráfico. O acréscimo na temperatura das telhas proporcionado pelo uso das mantas não foi percebido devido à nebulosidade do céu, cuja radiação solar máxima foi de 200 W/m<sup>2</sup>, não sendo suficiente para aquecer as telhas e transferir calor ao ambiente interno da edificação.

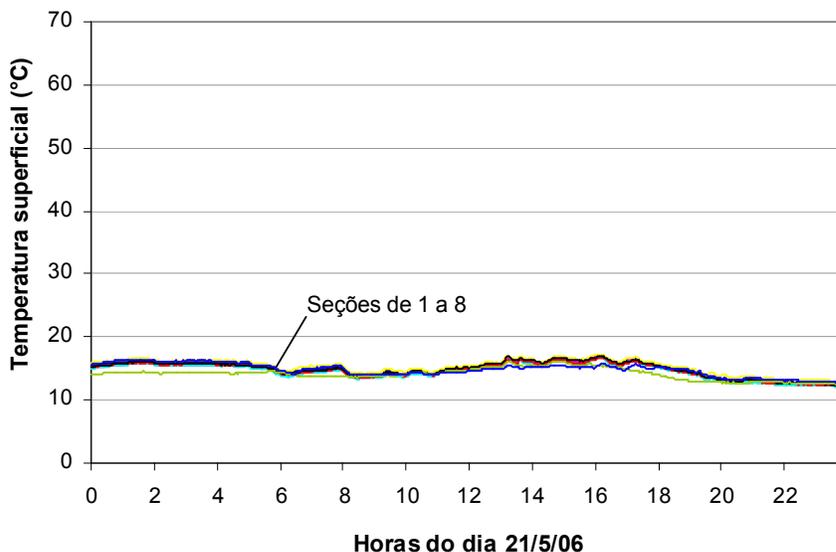


Ilustração 38 - Variação das temperaturas superficiais da telha - dia 21/5/2006

A Ilustração 39 representa a variação da temperatura superficial do forro no decorrer do dia 21/5/06. A temperatura do forro foi superior em relação às temperaturas das telhas. Neste gráfico, como as linhas que representam as seções ficaram próximas umas das outras, em função da pouca variação das temperaturas, foram apresentados somente as seções 1 (considerada padrão), 2 e 7. A seção 1 obteve a temperatura média do forro igual a 17,8 °C. A segunda seção obteve temperatura em torno de 18 °C. A seção 7 apresentou a menor temperatura superficial do forro, correspondente a 16,4 °C. Esta seção apresentou a maior redução na temperatura do forro por não ter uma camada de isolante térmico no interior, sendo assim sofreu a interferência da temperatura das telhas com mais intensidade.

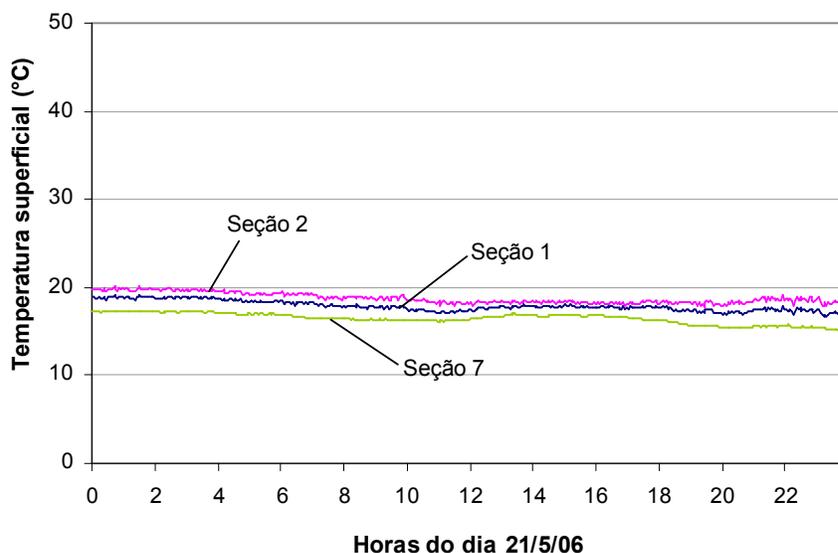


Ilustração 39 - Variação das temperaturas superficiais do forro - dia 21/5/2006

No último dia analisado, dia 31 de julho, a temperatura mínima externa atingiu aproximadamente 6°C e a máxima externa foi de 17,2 °C. Já no ático da edificação, a mínima foi 12,5 °C e a máxima atingiu 17,1 °C. Este dia foi considerado como um dos mais frios do período correspondente aos ensaios. A variação da temperatura superficial das telhas está representada na Ilustração 40. Com base nesta figura, foi possível observar que a temperatura das telhas nas seções sofreu acréscimos durante o dia e apresentou reduções para o período noturno. A temperatura mínima das telhas em relação às amostras analisadas encontrou-se na seção 4, em que a temperatura superficial foi de apenas 1,7 °C e na seção 2, apresentando a temperatura superficial igual a 1,8 °C. Na seção 1 (padrão), este valor atingiu 3,3 °C. A temperatura das telhas nas seções 2 e 4 foi menor em relação a seção 1 em razão das amostras presentes nestas duas seções dificultarem a perda do calor gerado no interior da edificação para o ambiente externo, assim, uma quantidade menor de calor atingiu a face das telhas quando comparada com a seção 1.

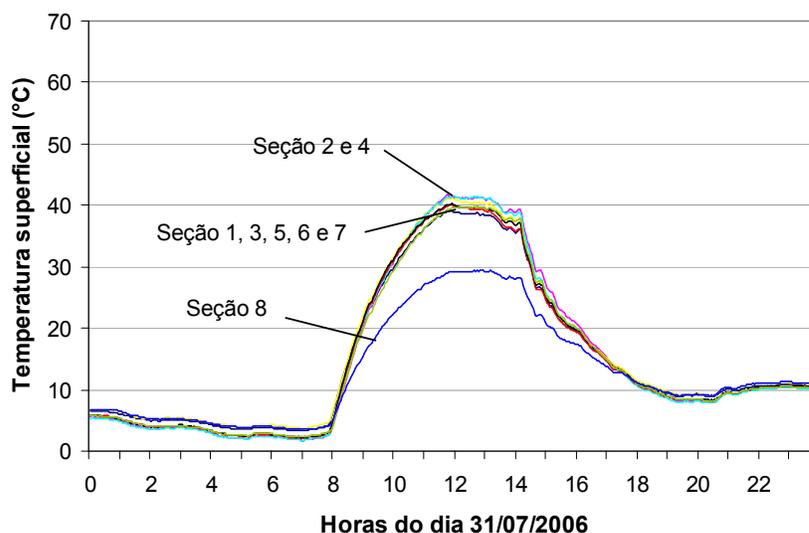


Ilustração 40 - Variação das temperaturas superficiais da telha - dia 31/7/2006

Em relação à temperatura superficial do forro, representada na Ilustração 41, foi observado que as seções 2, 4 e 7 apresentaram a maior redução na temperatura do forro em relação a seção 1, passando de 24,2 °C, na seção 1 durante o horário de pico, para aproximadamente 18,3 °C nas seções 2, 4 e 7. Estas seções também apresentaram maior temperatura superficial durante a noite, em função da redução das perdas de calor advindas do interior da edificação. A seção que apresentou a maior temperatura do forro (durante o dia) foi a 3 (lona plástica preta), por permitir maior transferência de calor para o interior. As seções 5, 6, e 8 apresentaram a temperatura superficial em torno de 20 °C para o horário de pico.

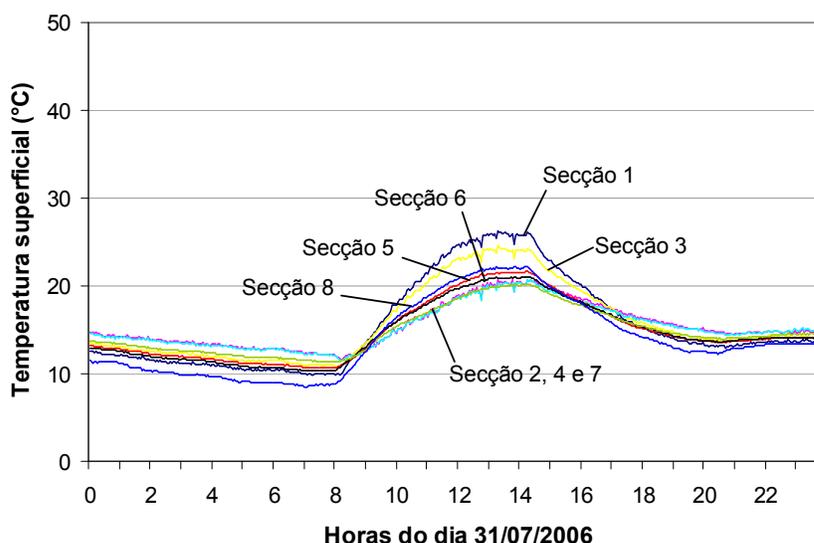


Ilustração 41 - Variação das temperaturas superficiais do forro para o dia 31/7/2006

Os valores das temperaturas superficiais para as telhas e para o forro, correspondente ao horário de pico dos três dias analisados, estão apresentados na Tabela 16. Para o dia 22/2 este horário ocorreu às 13 horas, durante o dia 21/5 este horário ocorreu às 16 horas e 14 minutos e para o dia 31/7, o horário de pico ocorreu às 11 horas e 49 minutos.

Verificou-se que, em dias com forte radiação solar, as temperaturas superficiais das telhas nas seções que continham manta isolante aumentaram, em maior ou menor grau, dependendo do tipo de manta utilizada: mantas com alumínio de boa qualidade na (s) face (s) apresentaram maiores acréscimos (seção 2 e 4) do que as formadas por polímero aluminizado (seção 5). As seções 7 e 8 foram as que apresentaram a maior redução nas temperaturas superficiais das telhas, em razão da presença de água nos poros e da absorvidade da telha, respectivamente. A temperatura das telhas diminuiu em 9,9 °C, para o dia 31/7 na seção 8, e em 15,6 °C e 12,9 °C para o dia 22/2 nas seções 7 e 8. Durante o mês de julho, esta redução não foi percebida para a seção 7, em função da presença de um isolante térmico (folha de EPS) no seu interior, a qual ocasionou uma pequena elevação na temperatura das telhas, passando de 39 °C na seção 1, considerada padrão, para 39.3 °C na seção 7, conforme está ilustrado na Tabela 16.

Tabela 16

Variação da temperatura superficial para o horário de pico dos dias analisados

Dia	Temperatura (°C)	Seções							
		1	2	3	4	5	6	7 <sup>3</sup>	8
22/2	Telha <sup>4</sup>	59	63.5	61.1	62.6	60.6	60.8	43.4	46.1
	Forro <sup>5</sup>	40.3	33.2	38.2	32	35.1	34	34	35.5
21/5	Telha	17.0	16.9	17.2	16.7	16.6	16.9	15.3	15.8
	Forro	17.9	18.3	18.0	18.0	17.6	17.5	16.8	16.9
31/7	Telha	39	41.5	41.1	41.4	40	40.1	39.3	29.1
	Forro	24.2	18.3	22.7	18.3	19.8	19.4	18.3	20.5

#### 4.3.3 Cálculo das eficiências ( $\eta$ )

As eficiências foram calculadas de três diferentes maneiras. A eficiência de ganho ou perda de calor foi calculada através da energia total, em  $J/m^2$ , absorvida ou perdida pela cobertura. Desta forma, foi obtida a eficiência energética da cobertura quando a mesma recebeu ou perdeu calor. A Ilustração 42 representa a comparação entre as seções 1 e 4, em relação a quantidade de energia absorvida e perdida pela cobertura da edificação para o dia 22/2/2006. A seção 1 permitiu a passagem de  $1787996 J/m^2$  durante o período de ganho e permitiu a perda de  $-738419 J/m^2$ . Com a presença da barreira radiante (seção 4) a energia total que atingiu a parte superior do forro foi de  $535663 J/m^2$  e a perda total de energia foi de  $-279575 J/m^2$ . A seção 4 (manta comercial 1) reduziu em  $1252333 J/m^2$  a transferência de energia para o interior da edificação em relação a seção 1 (sem manta).

<sup>3</sup> Nesta seção, a partir do mês de junho, foi inserido um isolante térmico, uma folha de EPS, com espessura igual a 10 mm.

<sup>4</sup> Temperatura medida na face inferior da telha.

<sup>5</sup> Temperatura medida na face superior do forro.

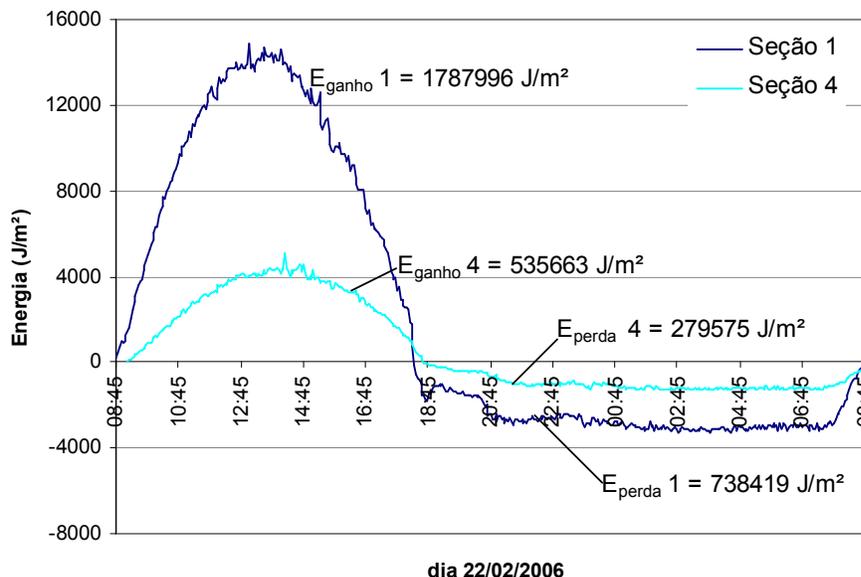


Ilustração 42 – Energia absorvida e perdida pela cobertura para o dia 22/2/2006

A eficiência média para o dia, foi calculada através da média do fluxo de calor ( $W/m^2$ ) para o dia inteiro, retirando-se os valores entre as 8 e 10 horas e entre as 18 e 20 horas, pois, neste horário, o fluxo de calor nas amostras é pequeno (de  $10 W/m^2$  a  $-10 W/m^2$ ) e os valores de eficiência foram superestimados.

A eficiência para o horário de pico foi calculada através do fluxo de calor máximo lido pelo fluxímetro durante o dia analisado.

Das três formas de calcular a eficiência, foi considerada como mais adequado o cálculo realizado através da energia total absorvida ou perdida pela cobertura. Assim, foi obtida a eficiência energética da barreira radiante para o dia considerado.

O cálculo da eficiência através da média (para o dia inteiro) pode apresentar valores que não são considerados bons, uma vez que a média do fluxo de calor para cada amostra é muito pequena. Assim, a razão para calcular a eficiência pode fornecer valores que não condizem com a realidade, como foi observado para o dia 31/07/2006.

#### 4.3.4 Análise das eficiências ( $\eta$ )

Em virtude dos resultados serem apresentados em forma de gráficos, inicialmente optou-se por realizar uma análise qualitativa (figuras) para os dias

analisados. Posteriormente será realizada a análise quantitativa (tabelas) para as mesmas situações.

A Ilustração 43, Ilustração 44 e Ilustração 45 mostra a eficiência das seções ao longo dos dias analisados. Os horários em que os valores de fluxo de calor aproximaram-se do zero foram desconsiderados, pois forneceu valores superestimados de eficiência. Estes horários geralmente ocorreram quando o telhado começou a receber calor (das 8 às 10 horas) e ao entardecer, quando o mesmo começou a perder calor para o ambiente externo (das 18 às 20 horas). Estes horários foram marcados nos gráficos com a presença de uma faixa em cor cinza sobre as eficiências desconsideradas, para o dia 22/2 e 31/7. Durante o dia 21/5, em razão do fluxo de calor ter sido negativo e ter apresentado uma tendência a ser constante durante o dia inteiro, todos os valores das eficiências foram considerados.

A Ilustração 43 mostra o gráfico da variação da eficiência ao longo do dia 22/2. Para este dia, foi observado que a seção 4 obteve a maior eficiência, seguido pela seção 2. As seções 5 e 6 atingiram eficiências menores do que as seções 2 e 4, em função da presença de uma camada de polietileno sobre a face aluminizada da barreira radiante. As seções 7 e 8 aparecem no gráfico somente para o horário de ganho de energia, uma vez que durante o horário de perda de calor, estas seções permitiram a transferência de calor para o ambiente externo em maior quantidade do que a seção 1 (padrão).

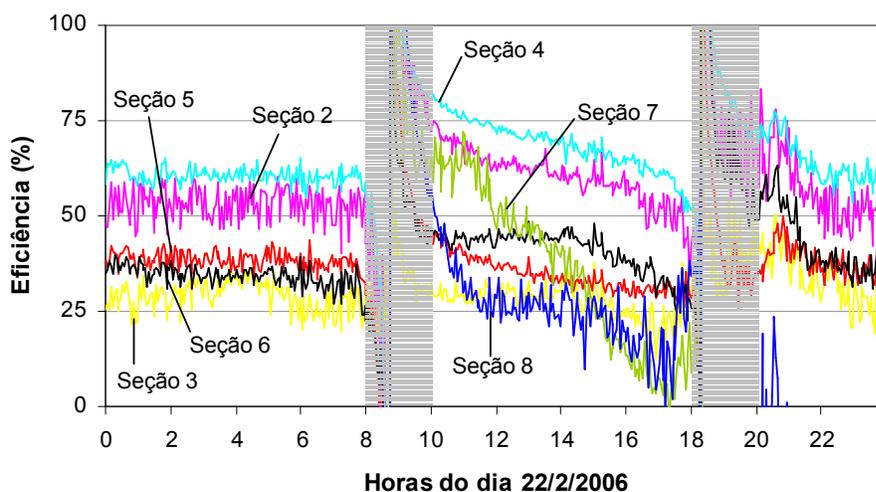


Ilustração 43 – Eficiência das amostras analisadas para o dia 22/2/2006

De acordo com a Tabela 17, as seções 2 e 4, restringiram a entrada de 62% e 70% da energia total que atingiu o ambiente interno da residência, respectivamente. A seção 6 atingiu eficiência de 42%, enquanto que a seção 5 obteve a eficiência de 35%.

Durante o período de perda de energia pela cobertura, as seções que atingiram o melhor desempenho, 2 e 4, alcançaram a eficiência de 55% e 63%. As seções 5 e 6, evitaram a perda de 38% de energia.

As seções 7 e 8 foram ineficientes durante o período de perda de energia, ou seja, perderam mais calor para o exterior do que a seção 1 (padrão). Já para o período de ganho, a seção 7 reduziu a transferência em de calor 40%, sendo mais eficiente do que a barreira radiante presente na seção 5. A seção 8 reduziu a passagem de calor em torno de 30%, devido à baixa absorvidade das telhas.

Tabela 17

Cálculo da eficiência para as amostras no dia 22/2/2006

Seção	Amostra	Descrição	Eficiência ( $\eta$ ) das amostras analisadas (%)			
			$\eta$ perda	$\eta$ ganho	$\eta$ dia inteiro	$\eta$ horário de pico (13 horas)
1	-	Caso padrão (sem manta)	-	-	-	-
2	A	Al polido	55	62	67	63
3	B	Lona preta	31	28	27	33
4	J	Manta comercial 1	63	70	76	73
5	D	Manta comercial 2	38	35	34	39
6	R	Manta 3 – embalagem longa vida	38	42	46	48
7	-	Sem manta e com telha porosa	-26	40	85	48
8	-	Sem manta e com telha pintada de branco	-30	28	68	30

A Ilustração 44 representa a variação da eficiência das seções para o dia 21/5. Diferentemente do dia 22/2, este dia não apresentou valores de eficiência desconsiderados. Isto ocorreu pelo fato da cobertura ter perdido calor o dia inteiro, não havendo os períodos em que a mesma começou a ganhar ou perder calor. A

seqüência das seções que atingiram as melhores eficiências foi a mesma do dia 22 de fevereiro. A seção 4 (manta comercial 1) foi a mais eficiente. Em seguida, encontra-se a seção 2 (alumínio de cozinha), a qual apresentou a segunda melhor eficiência. As linhas que representam as eficiências das seções 3, 5 e 6 ficaram sobrepostas umas as outras, cujas eficiências foram muito parecidas neste dia. As seções 7 e 8 não aparecem neste gráfico, pois a eficiência das mesmas foi negativa, ou seja, perderam mais calor do que a seção 1.

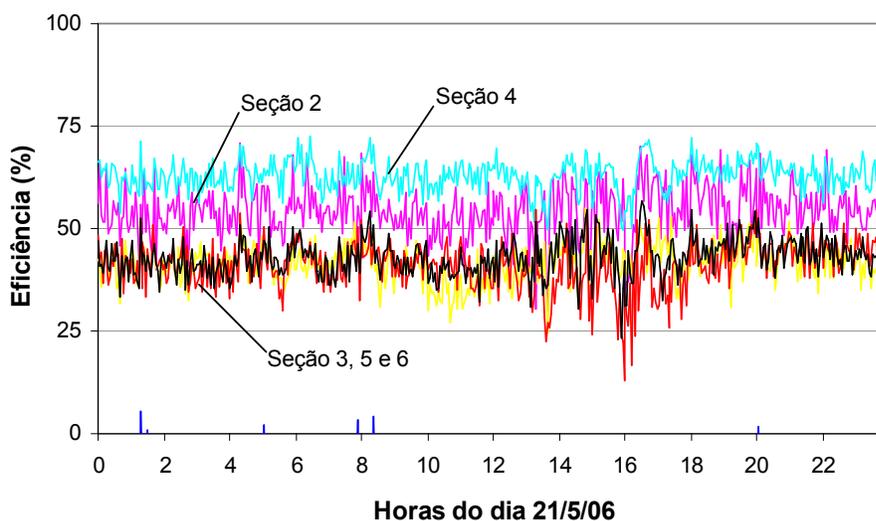


Ilustração 44 - Eficiência das amostras para o dia 21/5/2006

Como o dia 21/05 foi um dia nublado, a cobertura da edificação perdeu calor durante o dia inteiro, assim não foi calculada a eficiência para o período de ganho de calor. A Tabela 18 mostra os valores das eficiências das amostras para o período de perda, para a média diária e para o horário de pico. O horário de pico para este dia correspondeu ao horário em que a cobertura da edificação perdeu menor quantidade de calor, que ocorreu às 16 horas e 14 minutos.

Tabela 18  
Cálculo da eficiência para as amostras no dia 21/05/2006

Seção	Amostra	Descrição	Eficiência ( $\eta$ ) das amostras analisadas (%)		
			$\eta$ perda	$\eta$ dia inteiro	$\eta$ horário de pico
1	-	Caso padrão (sem manta)	-	-	-
2	A	Al polido	54	54	42
3	B	Lona preta	42	42	39
4	J	Manta comercial 1	63	63	50
5	D	Manta comercial 2	42	42	17
6	R	Manta 3 – embalagem longa vida	43	43	37
7	-	Sem manta e com telha porosa	-47	-47	-200
8	-	Sem manta e com telha pintada de branco	-27	-27	-122

Com base na Tabela 18 observou-se que a eficiência das amostras para período de perda foi parecida com a eficiência de perda dos dias 22/2 e 31/7. Também foi observado que não houve diferença entre as eficiências das amostras para o período de perda e para o dia inteiro, uma vez que a cobertura perdeu calor durante as 24 horas do dia, ou seja, a eficiência de perda corresponde integralmente a eficiência do dia inteiro. As seções 2 e 4 atingiram a maior eficiência, reduzindo a perda de calor em 54% e 63% para o ambiente externo. As seções 5 e 6 obtiveram a eficiência menor do que estas duas amostras, diminuindo a perda em 42% e 43%, respectivamente.

A partir do mês de junho, na seção 7 foi inserido um isolante térmico, uma folha de EPS, e as telhas que haviam na seção foram substituídas pelas originais da cobertura (esmaltadas de coloração avermelhada). Desta forma, a eficiência da seção 7 para o dia 31/7 apresentou ser mais eficiente do que nos outros dois dias analisados. A folha de EPS foi eficaz em reduzir a transferência do calor tanto durante o horário de ganho quanto para o horário de perda de energia, sendo uma das seções que apresentou maior desempenho, conforme mostra a Ilustração 45.

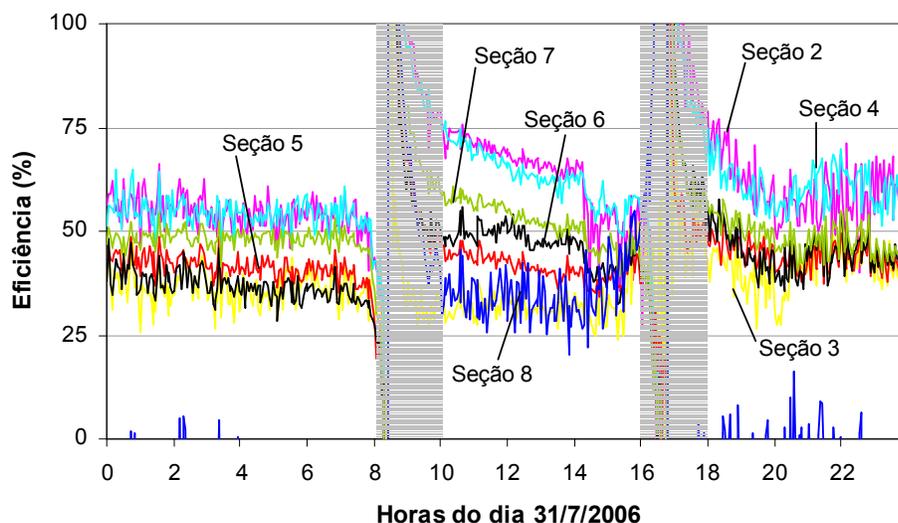


Ilustração 45 – Eficiência das amostras para o dia 31/7/2006

De acordo com a Tabela 19, a eficiência para a média diária do dia 31/7, apresentou valores negativos. Isto ocorreu em função do fluxo de calor médio, calculado para o dia inteiro desconsiderando os valores muito próximos do zero ( $10 \text{ W/m}^2$  a  $-10 \text{ W/m}^2$ ), ter sido quase nulo em todas as seções. Sendo assim, esta forma de calcular a eficiência não foi a mais adequada.

Para o período de ganho, as seções mais eficientes, assim como nos demais dias, foram a 2 e a 4, reduzindo em 67% e 66% a entrada de calor para o interior. A seção 7 (folha de EPS) obteve a eficiência igual a 54%, atingindo melhor desempenho do que as seções 5 e 6, as quais apresentaram a eficiência de 43 e 48%, respectivamente.

O período de perda de energia foi caracterizado pelas seções 2 e 4 terem atingido a eficiência de 56%. A seção 7 reduziu a perda de calor em 48% ao ambiente externo. As seções 5 e 6 apresentaram a eficiência de 42 e 39%, respectivamente.

Tabela 19  
Cálculo da eficiência para as amostras no dia 31/07/2006

Seção	Amostra	Descrição	Eficiência ( $\eta$ ) das amostras analisadas (%)			
			$\eta$ perda	$\eta$ ganho	$\eta$ dia inteiro	$\eta$ horário de pico (13 horas)
1	-	Caso padrão (sem manta)	-	-	-	-
2	A	Al polido	56	67	-486	69
3	B	Lona preta	38	32	333	34
4	J	Manta comercial 1	56	66	-428	68
5	D	Manta comercial 2	42	43	20	45
6	R	Manta 3 – embalagem longa vida	39	48	-409	52
7	T	Manta de EPS	48	54	-237	57
8	-	Sem manta e com telha pintada de branco	-20	37	-2830	37

Percebeu-se que para os dias 22/2/2006 e 31/7/2006 os valores obtidos para a eficiência durante período de ganho de energia não diferiram significativamente das eficiências para o horário de pico. A diferença entre os resultados foi menor que 5%, exceto a seção 7, para o dia 22/2/2006, onde a diferença foi igual a 8%.

Para os três dias analisados nesta pesquisa, as seções 2 e 4 obtiveram a melhor eficiência em relação às demais seções em função de possuírem baixa emissividade nas superfícies. Também foi verificado que a seção 5 (manta comercial 2) apresentou menor eficiência do que a seção 6 (embalagem longa vida), mostrando que existem mantas comercializadas que não possuem a eficiência garantida. Este resultado evidenciou a necessidade da formulação de normas nacionais que tratem da fabricação e da instalação das barreiras radiantes.

A eficiência para o período de perda dos dias analisados tendeu a ser menor do que a eficiência para o horário de ganho de energia, ou seja, a eficiência apresentou melhores resultados com a presença da radiação solar, pois aumentou a diferença de temperatura entre as telhas e o forro.

#### 4.3.5 Comparação dos resultados teórico-experimentais (*em campo*)

A Tabela 20 mostra a comparação entre os resultados dos ensaios *em campo* e teórico, para o modelo da potência constante e da diferença de temperatura constante. As eficiências foram calculadas para o horário de pico de cada dia analisado. Os dados para calcular as eficiências teóricas, como radiação solar, coeficiente de convecção externo, temperatura do ar e diferença de temperatura entre o forro e a telha, foram obtidos através das medições *em campo*.

Tabela 20

Comparação teórico-experimental (*em campo*) das eficiências.

Data	Seção	Amostra	Eficiência ( $\eta$ ) experimental <i>em campo</i> (%)	Eficiência teórica ( $\eta_{pot}$ ) (%)	Eficiência teórica ( $\eta_{\Delta T}$ ) (%)
22/2/2006	2	A	63	74	82
	3	B	33	23	33
	4	J	73	74	81
	5	D	39	32	41
	6	R	48	47	59
6/3/2006	2	A	59	75	82
	3	B	30	23	36
	4	J	69	74	82
	5	D	38	32	45
	6	R	47	48	61
15/4/2006	2	A	59	74	81
	3	B	33	23	35
	4	J	72	74	81
	5	D	41	33	43
	6	R	50	48	59
14/5/2006	2	A	61	73	81
	3	B	34	22	33
	4	J	71	73	80
	5	D	45	31	40
	6	R	48	46	58
1/6/2006	2	A	60	73	81
	3	B	35	22	31
	4	J	71	73	80
	5	D	44	31	42

Tabela 20  
 Comparação teórico-experimental (em campo) das eficiências (continuação).

Data	Seção	Amostra	Eficiência ( $\eta$ ) experimental <i>em campo</i> (%)	Eficiência teórica ( $\eta_{pot}$ ) (%)	Eficiência teórica ( $\eta_{\Delta T}$ ) (%)
1/6/2006	6	R	49	46	59
31/7/2006	2	A	69	73	81
	3	B	34	23	31
	4	J	68	73	80
	5	D	45	32	40
	6	R	52	47	58
9/8/2006	2	A	68	74	79
	3	B	42	22	30
	4	J	66	74	79
	5	D	48	32	39
	6	R	55	47	55

Através desta comparação verificou-se que o resultado teórico obtido com o modelo da potência dissipada constante forneceu valores mais próximos da situação real em uma cobertura do que o modelo da diferença de temperatura constante. Os valores obtidos com a diferença de temperatura constante forneceram valores superestimados de eficiência, em função de não considerar o aumento na temperatura das telhas provocado pelo uso das barreiras radiantes e por não considerar as trocas de calor por convecção na superfície externa da camada isolante 1, referente a resistência térmica das telhas.

Considerando o modelo 2, as seções 2 e 3 apresentaram uma diferença significativa nos valores de eficiência experimental e teórica. Na seção 2, a diferença entre estes resultados, em alguns dias, foi superior a 15%. Fato que não deveria acontecer, uma vez que a manta da seção 2 possui emissividade, igual a 0.05 nas duas faces. Foi verificado, no término do mês de maio, que a folha de alumínio utilizada nesta seção por possuir baixa resistência mecânica, danificou-se, e desta forma, permitiu maior passagem de calor para o interior. No mês de junho, o alumínio foi substituído. Observou-se que nestes meses, a eficiência experimental e teórica diferiram entre 4 e 5%.

Os resultados das demais seções não diferiram representativamente entre si, mostrando que o modelo matemático 2 (potência dissipada constante) forneceu os valores próximos das medições em campo.

#### 4.3.6 Comparação das medições em campo x laboratório

Os ensaios do desempenho térmico das barreiras radiantes em laboratório foram realizados durante o mês de maio de 2006. Para as medições com o modelo 2, a potência dissipada pelo aparato experimental foi de 925 W/m<sup>2</sup>, próxima do pico da radiação solar em um dia típico de verão. Para os ensaios com o modelo 1, a diferença de temperatura foi mantida em 20°C. A eficiência energética foi calculada para o período de ganho do dia 22/2/2006, que ocorreu das 8 horas e 45 minutos às 18 horas e 45 minutos.

A comparação entre os resultados das eficiências das barreiras radiantes em campo e em laboratório está mostrada na Tabela 21.

Tabela 21

Comparação dos resultados das medições em campo e em laboratório (dia ensolarado)

Seção	Amostra	Configuração	$\eta_{\text{ganho campo}}$ (%)	$\eta_{\text{pot laboratório}}$ (%)	$\eta_{\Delta T \text{ laboratório}}$ (%)
2	A	Al polido	62	79	86
3	B	Lona preta	28	20	32
4	J	Manta comercial 1	70	68	89
5	D	Manta comercial 2	35	30	63
6	R	Manta 3 – embalagem longa vida	42	40	72

Observou-se que o modelo da potência dissipada apresentou valores de eficiência mais próximos das medições *em campo* do que o modelo da diferença de temperatura. Assim, o modo de medição que forneceu resultados mais condizentes com a realidade foi o 2 (potência dissipada constante).

A eficiência experimental em campo não diferiu significativamente dos resultados obtidos em laboratório para o modelo 2, exceto na seção 2 (alumínio de cozinha), onde a eficiência em campo foi de 62% e a experimental foi de 79% ( $\eta_{\text{pot}}$ ). Este fato possivelmente deve-se a algum dano que tenha ocorrido na amostra desta seção, uma vez que a folha de alumínio utilizada nesta pesquisa possui resistência mecânica baixa. Em relação aos resultados das demais barreiras radiantes

encontradas nas seções 4, 5 e 6, os resultados entre as medições apresentaram uma diferença máxima de 5%, evidenciando que o aparato experimental ainda precisa de alguns ajustes, porém, a diferença entre as eficiências não foi considerada significativa.

A comparação experimental em campo x laboratório, para um dia com pouca radiação solar (dia 21 de maio) está apresentada na Tabela 22.

Tabela 22

Comparação dos resultados das medições em campo e em laboratório (dia nublado)

Seção	Amostra	Configuração	$\eta_{perda}$ campo (%)	$\eta_{pot}$ laboratório (%)	$\eta_{\Delta T}$ laboratório (%)
2	A	Al polido	54	80	89
3	B	Lona preta	42	18	25
4	J	Manta comercial 1	63	71	88
5	D	Manta comercial 2	42	36	64
6	R	Manta 3 – embalagem longa vida	43	46	73

O modo de medição que mais se aproximou das medições *em campo* foi o modelo 2. Porém a diferença entre as eficiências em campo e em laboratório ( $\eta_{pot}$ ) foi superior a do dia 22 de fevereiro. Deve-se lembrar que durante este dia, houve a presença da chuva na face externa das telhas, que pode ter influenciado esta diferença.

A seção 2 apresentou a maior diferença entre as eficiências obtidas *em campo* e em laboratório. Nesta seção, a eficiência obtida *em campo* foi de 54% e a eficiência obtida em laboratório ( $\eta_{pot}$ ) foi de 80%. Assim como no dia 22/2/2006, tal diferença deve-se a um dano que tenha ocorrido na manta. A seção 4 apresentou eficiência em campo igual a 63% e eficiência em laboratório ( $\eta_{pot}$ ) de 71%. As seções 5 e 6 obtiveram eficiência em campo parecida, em torno de 43%. A eficiência obtida em laboratório ( $\eta_{pot}$ ) para estas duas seções foi de 36% e 46%, respectivamente.

## **CONCLUSÃO**

O aparato experimental utilizado nesta pesquisa teve como objetivo a realização de medições em laboratório da redução da transferência de calor em coberturas com o uso de isolantes térmicos reflexivos. Desta forma, o sistema procurou reproduzir da forma compacta a cobertura de uma edificação submetida à radiação solar e às trocas de calor por convecção. O modelo da diferença de temperatura constante apresentou como característica principal a simplicidade e rapidez, onde para cada medição foi necessário um período de 15 minutos. O segundo modelo, da potência constante, reproduziu de forma mais realista o comportamento de uma cobertura. O intervalo entre cada medição foi superior a 40 minutos.

Dentre as barreiras radiantes analisadas em laboratório, algumas apresentaram o desempenho térmico menor em relação às demais mantas. Normalmente estas mantas eram do mesmo fabricante. Dos cinco fabricantes testados, dois não atingiram bons valores de eficiência. Este fato está associado à adição de uma camada de polietileno sobre a face de baixa emissividade da manta ou mesmo ao material que compõe a barreira radiante. Algumas empresas utilizam um polímero aluminizado, que não possui baixa emissividade. Conseqüentemente as mantas constituídas por este material permitem maior transferência do calor do

que o alumínio. A diferença da eficiência das barreiras radiantes analisadas nesta pesquisa evidência a ausência de normas sobre especificações técnicas, que tratem da fabricação e instalação deste tipo de isolante térmico.

Em relação às barreiras radiantes formadas através das embalagens longa vida, foi verificado que as mesmas são mais eficientes que algumas mantas encontradas no mercado da construção civil. A manta com a camada de polietileno sobre a face aluminizada, obteve eficiência superior a oito isolantes reflexivos comerciais analisados. Já a manta sem camada de polietileno tem eficiência compatível com as melhores barreiras radiantes encontradas no mercado da construção civil. Desta forma, o seu emprego em habitações de caráter popular deve ser incentivado, uma vez que se trata da reutilização de um resíduo sólido urbano de fácil acesso e de baixo custo.

A comparação teórico/experimental em laboratório para o modo de medição 1 diferiu significativamente. O mesmo foi verificado para o modelo 2. O modelo da potência dissipada apresentou valores de eficiência menores em relação ao modelo 1, em função do acréscimo na temperatura das telhas provocado pelo isolante térmico. Comparando-se estes dois modelos com as medições *em campo*, observou-se que o modelo 2, da potência dissipada constante, forneceu resultados mais próximos da situação real em uma cobertura. Porém, serão necessários alguns ajustes no dispositivo, como por exemplo, corrigir o coeficiente de convecção externo, pois nos ensaios foi utilizado o valor do coeficiente de trocas de calor por convecção para ambientes internos. Também é necessário proporcionar uma inclinação ao dispositivo, a qual simule a inclinação do telhado.

Através desta pesquisa, também se comprovou que a eficiência das barreiras radiantes é influenciada pelo depósito de poeira sobre a superfície aluminizada. Quanto maior a quantidade de poeira depositada, maior é a passagem de calor para o interior da edificação e menor é a eficiência da barreira radiante, devido ao acréscimo no valor de sua emissividade.

Em relação aos ensaios em campo, foi possível analisar a influência das barreiras radiantes no fluxo de calor total que atingiu a superfície superior do forro durante o período de fevereiro a agosto de 2006. Houve redução na transferência de calor em todas as seções para o período de ganho de energia através da cobertura. As barreiras radiantes também reduziram a emissão do calor gerado no interior da edificação para o ambiente externo durante o período de perda de energia (durante

a noite, dias frios e/ou muito nublados), trazendo benefícios para o período do inverno na região sul do Brasil.

As maiores eficiências ocorreram com as amostras B e J, em função da baixa emissividade destas duas barreiras radiantes. A amostra C apresentou a eficiência menor do que a amostra R (longa vida com a camada de polietileno) para todos os dias analisados, evidenciando que muitos produtos comercializados não têm a eficiência garantida. Como no Brasil ainda não existem normas técnicas relacionadas à fabricação e instalação deste tipo de isolante térmico, muitas empresas utilizam algum outro material sobre o alumínio, ou o material que forma a barreira radiante é um polímero aluminizado. O uso destes materiais eleva a emissividade da barreira radiante, que deve ser em torno de 0,05 a 0,1.

Foi observado que a presença das barreiras radiantes aumentou a temperatura superficial das telhas. A temperatura da face superior do forro reduziu em todos os casos em relação à seção padrão. As seções que continham as amostras B e J foram as que obtiveram a menor temperatura superficial do forro. Para o dia nublado não foi observado o efeito do uso das barreiras radiantes no que se refere às temperaturas superficiais. Também foi verificado que as telhas cerâmicas porosas e as telhas brancas reduziram representativamente a temperatura superficial das telhas.

## **SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS**

- Refazer a bancada experimental, proporcionando inclinação à cobertura. Esta inclinação pode ser regulável, a fim de avaliar o desempenho térmico da cobertura variando a angulação do mesmo.
- Corrigir as trocas de calor por convecção nas superfícies do dispositivo experimental, uma vez que o aparato experimental está montado numa sala, desta forma, o coeficiente de trocas de calor por convecção foi considerado na pesquisa o mesmo para ambientes internos.
- Avaliar os parâmetros, como radiação solar e trocas de calor por convecção individualmente no dispositivo experimental. Pois ao tentar avaliar estes

parâmetros em campo, eles ocorrem simultaneamente. As trocas de calor por convecção podem ser estudadas tanto na face externa das telhas e do forro, bem como no interior do dispositivo, proporcionando ventilação no interior do mesmo (nas camadas de ar formadas com a instalação da barreira radiante).

- Formulação de normas técnicas que tratem da fabricação e instalação deste material, a fim de evitar que muitos produtos sejam comercializados sem ter a eficiência garantida.

## REFERÊNCIAS

AL-HOMOUD, Mohammad S. Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. ***Building and Environment*** v. 40 p. 353-366, 2005.

ANTUNES, Bianca. Mantas com uma ou duas faces de alumínio melhoram o conforto térmico da construção e protegem contra infiltrações. ***Revista Construção & Mercado***, 2004.

ARMELIN, Hugo S. CHERRY, Nigel. Avaliação do uso e desempenho de barreiras de radiação térmica na construção civil. ***Revista e-Mat***, V. 1, n.1, p.79-82, Maio 2004.

BEJAN, A. ***Convection Heat Transfer***. 2 ed. USA: Mac GranHill, 1990.

CEMPRE – ***Compromisso Empresarial para reciclagem*** –. Disponível em: <[http://www.cempre.org.br/fichas\\_tecnicas\\_emb\\_carton.php](http://www.cempre.org.br/fichas_tecnicas_emb_carton.php)> Acesso em setembro de 2005.

CERQUEIRA, Mario henrique de. ***Placas e telhas produzidas a partir da reciclagem do polietileno / alumínio presentes nas embalagens tetra pak***. Disponível em: < <http://www.tetrapak.com.br> >

CHEIKH, Hamida Ben. BOUCHAR, Ammar. Passive cooling by evapo-reflective roof for hot dry climates. ***Renewable Energy***, v 29, p. 1877-1886, 2004.

CUNHA, C. G. da. NEUMANN, Walter. ***Manual de impermeabilização e isolamento térmico – Como projetar e executar***. Rio de Janeiro, RJ. 1979.

Department of Energy/CE-0335P. Assistant Secretary. ***Energy Efficiency and Renewable Energy. Radiant barrier attic fact sheet***, 1991. Disponível em: <[http://www.ornl.gov/sci/roofs+walls/radiant/rb\\_01.html](http://www.ornl.gov/sci/roofs+walls/radiant/rb_01.html)>, último acesso em outubro de 2005.

SCHMUTZLER, Luis Otto Faber. UNICAMP - ***Projeto Forro Vida Longa***, 2001. Disponível em <[http://www.fem.unicamp.br/~vidalong/projeite\\_sol.html](http://www.fem.unicamp.br/~vidalong/projeite_sol.html)> Acesso em setembro de 2005.

FAREY, Philip. Radiant Energy Transfer and Radiant Barrier Systems in Buildings, **Florida Solar Energy Center**, Publication DN – 6, 1994a.

FAREY, Philip. Designing and Installing Radiant Barrier Systems, **Florida Solar Energy Center**, Publication DN – 7, 1994b.

FROTA, Anésia Barros., SCHIFFER , Sueli Ramos. **Manual de Conforto Térmico**. São Paulo, 1988.

GONZÁLEZ, A. ROLDÁN, J.E., SUÁREZ, J. Control de radiación en cubiertas de fibrocemento. In: **VI Encontro Nacional e III Encontro Latino Americano sobre Conforto no Ambiente Construído**, 2005, Alagoas, Maceió. *Anais do VI ENCAC, 2005*, Maceió.

GÜTHS, S., PHILIPPI, P.C., GAVIOT, E. e THERY, P., 1995, Um transdutor de fluxo de calor a gradiente tangencial. In: **XI Congresso Brasileiro em Engenharia Mecânica, 1995, Belo Horizonte**, Minas Gerais. *Anais do XI COBEM, 1995*, Belo Horizonte.

GÜTHS, Saulo. PAGHI, C, E. Um método de análise da eficiência energética de mantas isolantes reflexivas. In: **I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, 2004, São Paulo, SP. *Anais do ENTAC, 2004*, São Paulo.

KRÜGER, Eduardo L. SUETAKE, Graziela Y. ADRIAZOLA, Márcia K.O. Avaliação do desempenho térmico de coberturas construídas de embalagens tetra pak. In: **Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído**, 2005, Maceió, Alagoas. ENTAC, p. 958-966.

LABAKI, Lucila.Chebel. OLIVEIRA, Marilela Cristina Ayres de. CIOCHI, Fabio Alves. A reutilização de embalagens tipo”longa vida” como isolante térmico para coberturas de fibrocimento sem forro. In: **Encontro Nacional sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis**. 2003, São Carlos, SP. ENECS, 2003.

LAMBERTS, Roberto. **Desempenho térmico de coberturas leves com ático: bancada de testes e modelo matemático**: UFRGS. 1983. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1983.

MEDINA, Mario A. A perspective on the effect of climate and local environmental variables on the performance of attic radiant barriers in the United States. ***Building and Environment***, v. 41, p. 1767-78, 2006.

MEDINA, Mario A. On the performance of radiant barriers in combination with different attic insulation levels. ***Energy and Buildings***, v. 33, p. 31-40, 2000 a.

MEDINA, Mario A. Effects of shingle absorptivity, radiant barrier emissivity, attic ventilation flowrate, and roof slope on the performance of radiant barriers. ***International Journal of Energy Research***, v. 24, p. 665-78, 2000 b.

MIRANVILLE, Frédéric. BOYER, Harry. MARA, Thierry. GARDE, François. On the thermal behaviour of roof-mounted radiant barriers under tropical and humid conditions: modelling and empirical validation. ***Energy and Buildings*** v. 35, p. 997-1008, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: ***Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator de calor solar de elementos e componentes de edificações***, 15220-2. Desempenho térmico de edificações - Parte 2, 2003.

PAGANI, M. C. Na caixinha de leite, o frescor da população. ***Jornal da Unicamp***, Vol 1, 2001, São Paulo, SP.

PARKER, Danny S. BARKASZI, Stephen F. Jr. CHANDRA, Subrato. BEAL, David J. ***Measured Cooling Energy Savings From Reflective Roofing Systems In Florida: Field And Laboratory Research Results***. Florida Solar Energy Center FSEC – p. 293-95, 1995. Disponível em:< <http://www.fsec.ucf.edu/bldg/pubs/pf293/index.htm>>

RIVERO, Roberto. ***Arquitetura e Clima: condicionamento térmico natural***. Porto Alegre: UFRGS, 1985.

RIZZO, Marçal Rogério. Lixo não é Lixo. ***Diário da Região***, São José de Rio Preto, 25 de janeiro de 2002, p.A-3.

SANTOS, Antônio Raimundo dos. Metodologia Científica. ***A construção do conhecimento***. 6 ed. Editora DP&A, 2004.

SOUBDHAN, T. FEUILLARD, T. BADE, F. Experimental evaluation material in roofing system under tropical climate. ***Solar Energy***, v. 79, p. 311-320, 2005.

Tetra Pak<sup>®</sup> – setembro de 2005.

Disponível em: [http://www.tetrapak.com.br/html/vocesabia/index\\_estrutura1.htm](http://www.tetrapak.com.br/html/vocesabia/index_estrutura1.htm)

TORREIRA, Raul P. *Isolamento térmico*. São Paulo, 1980.

VECCHIA, Francisco. Isolamento por reflexão. In: **VI Encontro nacional e III Encontro Latino-Amerino sobre Conforto no Ambiente Construído**, 2001, Campinas, São Paulo. Anais do VI ENCAC, Campinas, 2001.

VITTORINO, F. SATO, N.M.N. AKUTSU, M. Desempenho térmico de isolantes refletivos e barreiras radiantes aplicados em coberturas. In: **Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído**, 2003, Curitiba, Paraná. ENCAC, p. 1277-1284.

WINIARSKI, David W. O'NEAL, Dennis L. A quasi-steady-state model of attic heat transfer with radiant barriers. **Energy and Buildings**, v. 24, p. 183-194, 1996.

## APÊNDICE A – Calibração dos transdutores de fluxo de calor

Durante o dia 20/01/2006 foi realizada a calibração dos oito (8) transdutores de fluxo de calor utilizados para as medições *em campo*. Para tanto foi empregado o Método do transdutor auxiliar. O fluxo de calor perdido pelo isolante é medido por um transdutor previamente calibrado, sendo subtraído do valor dissipado pela resistência aquecedora. Este método considera que consiste no uso de uma resistência aquecedora colocada na superfície do transdutor que será calibrado (principal) e de um transdutor já calibrado (auxiliar) posicionado sobre esta resistência, todos com a mesma dimensão (0,01 m<sup>2</sup>). A resistência aquecedora gera uma potência conhecida, dissipando calor entre os dois transdutores. Determina-se então a fuga de calor (energia que não esta sendo absorvida pelo transdutor a ser calibrado) através do transdutor auxiliar, e considera-se que o restante da energia é transmitida através do transdutor principal. A Ilustração 46 mostra o sistema utilizado para a calibração dos fluxímetros.

No contato entre a o transdutor e a resistência aquecedora foi aplicado um gel (com pH neutro) para melhor a condutividade e aumentar a passagem o fluxo de calor na direção do transdutor principal.

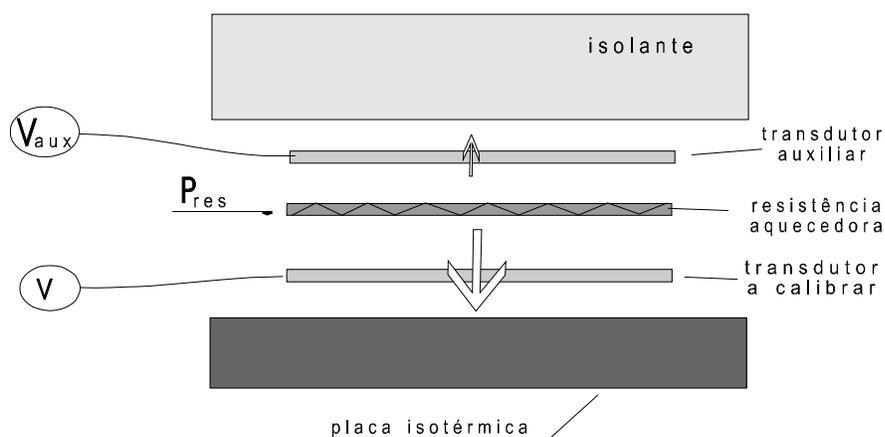


Ilustração 46 - Sistema de calibração com transdutor auxiliar

### Cálculo das constantes de calibração

Cada transdutor apresentou uma área de  $0.01\text{m}^2$  e a resistência térmica da resistência aquecedora foi de 84 Ohms. Com a potência (P) de 9,33 W calculou-se a corrente elétrica (I) necessária, de acordo com a Equação 27.

$$P = R \times I^2 \quad (4)$$

Onde:

P = potência (W)

R = resistência elétrica (Ohm)

I = corrente elétrica (A)

A corrente elétrica encontrada foi igual a 0,33 A. este valor empregado na resistência aquecedora produz a potência desejada. Esta potência é então dissipada na forma de calor. Os transdutores produzem um sinal de resposta em mV proporcional ao fluxo de calor que esta sendo transmitido, sendo este sinal é registrado por um multímetro digital. Utilizando a Equação 26 é possível determinar as constantes para os demais transdutores:

$$c = \frac{q'' - c_{aux} \times U_{aux}}{U} \quad (26)$$

Onde:

c = Constante de calibração do transdutor principal (W/mV);

$q''$  = Potência dissipada pela resistência aquecedora (W);

$c_{aux}$  = Constante de calibração do transdutor auxiliar (W/mV);

$U_{aux}$  = Sinal resposta da passagem de calor pelo transdutor auxiliar (mV);

U = Sinal resposta da passagem de calor pelo transdutor principal (mV).

As constantes de calibração para os oito fluxímetros utilizados na pesquisa estão apresentadas na Tabela 23.

Tabela 23  
Constantes de calibração dos transdutores de fluxo de calor

Transdutor	V	I	P	V x I	q"	V transdutor	V auxiliar	q" fuga	q" liquido	% fuga	c
1 (auxiliar)	28	0.33	9.33	9.24	933.3	13020	500	34.5	898.8	3.7	0.0690
2	28	0.33	9.33	9.24	933.3	5525	452	31.2	902.1	3.3	0.1633
3	28	0.33	9.33	9.24	933.3	9930	526	36.3	897.0	3.9	0.0903
4	28	0.33	9.33	9.24	933.3	14450	565	39.0	894.3	4.2	0.0619
5	28	0.33	9.33	9.24	933.3	9150	514	35.5	897.9	3.8	0.0981
6	28	0.33	9.33	9.24	933.3	10066	505	34.8	898.5	3.7	0.0893
7	28	0.33	9.33	9.24	933.3	9520	455	31.4	901.9	3.4	0.0947
8	28	0.33	9.33	9.24	933.3	19200	499	34.4	898.9	3.7	0.0468
Utilizando o 2 como aux do 1	28	0.33	9.33	9.24	933.3	12270	195	31.8	901.5	3.4	0.0735
Utilizando o 8 como aux do 1	28	0.33	9.33	9.24	933.3	12870	715	33.5	899.9	3.6	0.0699